

Année : 2009

THÈSE

présentée à

**L'U.F.R. DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DE L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ**

pour obtenir le

**GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ
DE FRANCHE-COMTÉ**

en AUTOMATIQUE

(Ecole Doctorale Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques)

Vision 3D et Commande par asservissements visuels pour la micro-manipulation et le micro-assemblage de MEMS

Application à l'automatisation d'une station de micro-assemblage

par :

Brahim TAMADAZTE

Soutenue le 26 novembre 2009 devant la Commission d'Examen :

Rapporteurs :

M. Jacques GANGLOFF

Professeur, Université de Strasbourg

M. Heinz HÜGLI

Professeur Honoraire, École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Examineurs :

M. Jean-Marc BREGUET

Docteur-Ingénieur, chef de groupe, C.S.E.M. Neuchâtel

M. Éric MARCHAND

Professeur, Université de Rennes 1

M. Michel PAINDAVOINE

Professeur, Université de Bourgogne

Directeurs de thèse :

Mme Nadine LE-FORT PIAT

Professeur, E.N.S.M.M. de Besançon

M. Soukalo DEMBÉLÉ

Maître de Conférences, Université de Franche-Comté

Les curieux sont toujours dupes de leur curiosité. Ils expliquent tout et ne comprennent rien [Georges Bernanos].

Dédicace.

à ma defunte grand-mère,

Remerciements

Par où commencer ?

Les remerciements, c'est une étape délicate pour un thésard ou plutôt pour un nouveau Docteur. Il faut savoir qu'une thèse n'est jamais un travail individuel. C'est tout un ensemble de paramètres qui permettent à l'aboutissement d'un tel projet (je parle d'un projet mais j'aurais pu parler d'un carton de problèmes auxquels il faut trouver des solutions). L'ambiance de travail est un facteur déterminant pour un thésard ou pour un chercheur en général. Personnellement c'est cette bonne ambiance de travail qui me donne cette envie de me lever chaque matin (de bonheur SVP) pour aller me frotter aux problèmes du micromonde. Ce sont les collègues qui sont les acteurs de cette bonne ambiance. Alors, chers collègues soyez les gardiens de cette bonne atmosphère. Oh, je ne suis qu'au 5ème jour après ma soutenance et j'ai déjà la nostalgie de ces trois années.

Donc pour commencer, je tiens à remercier Monsieur Nicolas Chaillet, directeur du Département Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques (AS2M pour les intimes) de l'institut FEMTO-ST et Professeur à l'Université de Franche-Comté. Je me rappelle qu'on a pris nos fonctions dans la même semaine (fin janvier 2007), lui en tant que directeur du département et moi en tant que thésard. Si je dois retenir une phrase de Nicolas ça sera celle là : soyez fantaisiste dans votre façon d'aborder la recherche et si vous buttez sur un problème dont la solution n'est pas évidente, changez de point de vue et vous verrez que ce problème apparaîtra tout de suite plus abordable. Changer de point de vue, c'est exactement ce que je fais avec mes caméras. Nicolas merci de m'avoir accueilli au sein du département.

Merci à mes directeurs de thèse : Nadine Le-Fort Piat, professeur à l'ENSMM et Soukalo Dembélé, Maître de conférences à l'UFC. Cette thèse n'est guère le fruit d'un travail personnel mais plutôt le fruit de notre collaboration. C'est naturel chez moi, j'ai tendance à m'appliquer davantage et davantage dans mon travail quand je sens que mes collaborateurs ont confiance en moi. Nadine, j'avoue que t'as eu beaucoup plus de courage que moi à la fin de la rédaction, pas moins de 5 relectures du manuscrit (5 * 240 pages), Donc merci pour votre confiance et faites pareil avec votre prochain thésard, vous

verrez finalement que, dans ces conditions, c'est naturel en chacun de nous de se donner à fond dans ce qu'il entreprend.

Je tiens à remercier mes rapporteurs : Jacques Gangloff, Professeur à l'Université de Strasbourg et Heinz Hugli, Professeur Honoraire à l'EPFL en Suisse, d'avoir accepté de consacrer de votre temps pour la lecture du manuscrit avec un grand intérêt. Un manuscrit de ce volume demande davantage de temps et concentrations. Merci pour le débat engagé pendant la soutenance sur l'ensemble du travail. Un débat qui me permettra de voir davantage certaines choses différemment.

C'est un honneur pour moi que Monsieur Michel Paindavoine, Professeur à l'Université de Bourgogne, ait accepté de présider ma soutenance de thèse. Monsieur Paindavoine, quelqu'un qui a énormément de recul par rapport à la recherche dans le domaine de l'imagerie. C'est toujours un plaisir de discuter avec lui *image*. De ces discussions est née une collaboration sur la micro-imagerie embarquée.

Je remercie Monsieur Jean-Marc Breguet, Docteur-Ingénieur, Chef de Groupe au CSEM en Suisse, d'avoir accepté de participer à ce jury. Vous avez apporté une expertise de qualité de manière générale sur l'ensemble des développements et de manière très précise sur la partie microrobotique. On peut dire que mes travaux de thèse ont été visités dans le moindre détail.

Je termine les officiels par Éric Marchand, fraîchement Professeur à l'Université Rennes 1. Deux fois merci. Primo d'avoir accepté d'apporter ton expertise en asservissement visuel dans ce jury. Secundo, pour notre collaboration commencée pendant ma thèse dont j'espère qu'il y aura l'après Brahim. J'ai visité le dossier [*mails-marchand*] récemment, des centaines de mails échangés. J'ai énormément appris sur l'asservissement visuel en si peu de temps. Des mails échangés même à des heures tardives même le dimanche à 1H du matin avec comme objet des mails °M_o. Éric, merci.

Je parlais de nostalgie à peine 5 jours après ma soutenance malgré que je sois une personne qui tourne la page assez rapidement. Cette nostalgie a une cause, la bonne ambiance. Dans la vie d'un thésard, il y a la partie travail qui représente 90 % de son temps, donc il lui reste 10 % dont il faut trouver des occupations. Et c'est là que l'équipe de choc intervient. Je fais référence à la bande qui a toujours pour souci de vider les bouteilles après les pots. Arnaud H., enseignant (toujours garant de la qualité des enseignements), chercheur (il lui suffit d'un crayon et du papier pour pondre des équations), auteur (il a écrit un livre, rien que ça). Pour l'extra travail, il est vanneur (champion de la vanne édition 2008, et moi celle de 2009) avec lui c'est du tac-o-tac. Charles-Henri F. dit le "Che", un informaticien (je pense!!!). Dans ces temps perdus, il produit du miel (le Chemiel) qui, il faut dire, excellent. Récemment reçu à un concours CNRS, donc maintenant, il dit plus "coucou" mais "concours". Laëtitia M., une expatriée au pays du froid, la Normandie. Entre elle et la "percée du vin jaune" c'est la grande histoire, 1kg de pâté pour prendre le goûter (bravo!!!). Membre très actif des videurs de bouteilles.

Anne D., jeune maman d'une petite fille "Zoé" (pour, moi ça sera toujours Janette). Neuf mois + 1 jour à ne pas boire une goutte d'alcool, un exploit (félicitations). Une fan des jeux de mots, si tu cherches quelque chose, il ne faut surtout pas lui demander où, la réponse te choquera. Mikael Paris, dit "le Micka", un gars qui tourne à la clope et au café (je comprendrai jamais comment tu tiens toute la journée). En tout les cas, j'espère qu'il y a une cafète au CEA. Guillaume F., à présent ingénieur à l'IRISA, j'ai aimé les moments passés à faire du code, du code et du code. Je ne vais pas pouvoir citer tous le monde, notamment les doctorants, alors un MERCI groupé à tous le monde.

Patrick R. (Patrick Pitt, pour intimes), Guillaume L. et Jérôme D. (ou plutôt sa femme Marie), merci d'avoir relu des parties de mon manuscrit. Je remercie également Eric Mermet, actuellement thésard à l'IGN, un ex binôme pendant mes études à Paris 6 et aujourd'hui un bon ami.

J'adresse également mes remerciements aux stagiaires-ingénieurs dont j'ai eu la chance d'encadrer les travaux, Thomas A., Liu L. et tout les autres.

Je termine ces remerciements par ma famille : mon père (Said) disait toujours que je travaillais dans les jouets, avec un certain recul ce n'est finalement pas faux et ma mère (Sadia), une femme intelligente qui aurait pu faire une carrière dans la recherche sans oublier mes frères (Mohand et Mourad) et ma soeur (Safia).

Fin

Table des matières

Glossaire des notations	xxxvii
Glossaire des abréviations	xliii
1 Introduction générale	1
1.1 Contexte	3
1.1.1 Le projet HYDROMEL	3
1.2 Motivations	4
1.2.1 Organisation du projet HYDROMEL	5
1.3 Objectifs scientifiques d'HYDROMEL	6
1.3.1 Objectifs à court terme	6
1.3.2 Objectifs à moyen terme	7
1.3.3 Objectifs à long terme	7
1.4 Positionnement du département AS2M dans HYDROMEL	7
1.4.1 Vision 3D	8
1.4.2 Asservissement visuel	9
1.5 Organisation du manuscrit	10
2 La manipulation et l'assemblage dans le micromonde	15
2.1 Marché mondial des microsystèmes	16
2.1.1 Domaines d'application des microsystèmes	17
2.1.2 Chronologie du microsystème	18
2.2 Micromanipulation et micro-assemblage	20
2.2.1 Micro-assemblage sériel	21
2.2.2 Micro-assemblage parallèle	22
2.3 Coût du micro-assemblage	23
2.4 Moyens d'observation du micromonde	24
2.4.1 Microscopie à champ lointain	25
2.4.2 Microscopie à champ proche	30
2.5 Microscope optique sur les stations de micro-assemblage et ses spécificités	33
2.5.1 Faible profondeur de champ	35

2.5.2	Faible champ de vision	36
2.5.3	Encombrement du microscope photonique	37
2.5.4	Faible distance de mise au point	38
2.5.5	Relation entre le contraste et l'illumination	39
2.6	Physique du micromonde	42
2.6.1	Forces surfaciques	43
2.6.2	Impact des microforces en micro-assemblage	46
2.7	Conclusion	47
3	Calibrage multi-échelle d'un microscope optique à l'aide d'une mire virtuelle 2D	49
3.1	Introduction	50
3.2	Calibrage d'un système de vision conventionnel	51
3.3	Le microscope optique Leica MZ16A	56
3.3.1	Tour d'horizon des méthodes de calibrage de microscopes optiques	57
3.3.2	Choix de la mire de calibrage	59
3.4	Modélisation multi-échelle	63
3.4.1	Calcul des paramètres extrinsèques	64
3.4.2	Calcul des paramètres intrinsèques	66
3.4.3	Résultats du calibrage	69
3.4.4	Analyse des résultats	70
3.4.5	Quelle mire choisir pour le calibrage ?	70
3.5	Conclusion	71
4	Autofocus, depth-from-focus et shape-from-focus	73
4.1	Introduction	74
4.2	Autofocus	75
4.2.1	Algorithmes basés sur le calcul des dérivées	76
4.2.2	Algorithmes basés sur le calcul d'histogramme	76
4.2.3	Algorithmes intuitifs	77
4.2.4	Algorithmes basés sur les statistiques	77
4.3	Implémentation de l'autofocus sur nos stations de micro-assemblage	78
4.4	Depth-from-focus	80
4.5	Tracking en temps réel de la pince par le microscope optique	81
4.6	Shape-from-focus	82
4.6.1	Sélection des points nets dans l'image	83
4.6.2	Filtrage gaussien	87
4.6.3	Filtrage basé sur l'analyse en composantes principales	89
4.6.4	Reconstruction 3D des doigts de la micro-pince	91
4.6.5	Estimation de l'orientation spatiale des doigts de la pince	92
4.7	Conclusion	95

5	Asservissement visuel 2D multi-échelle pour la micromanipulation	99
5.1	Introduction	100
5.2	Classification des asservissements visuels	103
5.2.1	Look and move	103
5.2.2	Asservissement visuel 2D	105
5.2.3	Asservissement visuel 3D	105
5.2.4	Asservissement visuel 2D1/2	107
5.2.5	Asservissement visuel d2D/dt	107
5.3	Modélisation type d'une loi de commande en asservissement visuel	107
5.4	Bref tour d'horizon sur l'utilisation de l'asservissement visuel dans le micro-monde	109
5.5	Algorithme de tracking "ESM"	114
5.6	Asservissement visuel 2D multi-échelle	115
5.6.1	Modélisation multi-échelle	116
5.6.2	Commande en fermeture du gripper	119
5.7	Partie expérimentale	120
5.7.1	Configuration de la station SAMMI	120
5.7.2	Cycle de pick and place automatisé	125
5.8	Étude et analyse des résultats obtenus	130
5.9	Améliorations à apporter	132
5.10	Planification de trajectoire	132
5.10.1	Paramétrisation de la courbe par un polynôme Bézier	135
5.10.2	Application à la manipulation de microbilles	135
5.10.3	Résultats expérimentaux	136
5.10.4	Manipulation de microfibres optiques	137
5.11	De la micromanipulation vers le micro-assemblage	140
5.12	Conclusion	141
6	Asservissement visuel 3D pour le micro-assemblage	143
6.1	Introduction	144
6.2	Motivations	146
6.3	Modélisation de la commande	147
6.3.1	Notations	147
6.3.2	Processus d'assemblage élémentaire	150
6.3.3	Élaboration d'une loi de commande de type pose-based visual servoing	151
6.4	Suivi 3D en temps réel en utilisant le modèle CAO	157
6.4.1	Loi de commande robuste	158
6.5	Application à l'assemblage de MEMS sur deux niveaux	163
6.5.1	Single tracking	163
6.5.2	Nouvelle configuration de la station SAMMI	163
6.6	Étude et analyse des résultats	164
6.6.1	Dual tracking	167
6.7	Analyse de la précision et de la répétabilité	170

6.7.1	Trajectoire du micro-objet	172
6.8	Assemblage de MEMS complexes sur trois niveaux	172
6.8.1	Notations	174
6.8.2	Sans moyens de solidarisation	177
6.8.3	Précision et solidité	178
6.8.4	Avec solidarisation à l'aide d'une colle UV	180
6.9	Conclusion	181
7	Conclusion et perspectives	183
7.1	Conclusion générale	183
7.2	Perspectives	186
7.2.1	Perspectives à court terme	187
7.2.2	Perspectives à moyen terme	187
7.2.3	Perspectives à long terme	188
	Bibliographie	191
	Index	203

Table des figures

1.1	Exemple d'un microsysteme.	2
1.2	Illustration des pays européens ainsi que des partenaires impliqués dans le projet HYDROMEL.	4
1.3	Auto-assemblage.	5
1.4	Assemblage robotique.	5
1.5	La structuration du projet HYDROMEL.	6
2.1	Exemple d'un MEMS pour le domaine du biomédical : la matrice injectrice d'insuline chez les diabétiques.	17
2.2	Exemple d'un spectromètre réalisé par le laboratoire ARRI de l'Université Arlington du Texas aux USA.	19
2.3	Un exemple de NEMS.	19
2.4	La chronologie de l'apparition et de l'évolution des microsystemes depuis les années 1960.	20
2.5	Micro-assemblage en série, [RAK06].	21
2.6	Micro-assemblage déterministe.	22
2.7	Illustration d'un assemblage robotique parallèle (approche déterministe), [PS02].	23
2.8	Illustration d'un assemblage robotique parallèle (approche stochastique), [CBN+98].	23
2.9	Représentation du temps nécessaire pour le positionnement en fonction de la précision requise.	24
2.10	Le microscope de Hooke.	26
2.11	Illustration sur le choix du système de vision en fonction de la résolution requise.	27
2.12	Un exemple d'une image prise par un microscope photonique (grossissement de 400×) d'une cellule biologique.	28
2.13	Un exemple d'une image prise par un microscope confocal de type Biorad MRC 1024.	29
2.14	Un exemple d'une image d'un anticorps prise par un microscope à fluorescence.	29

2.15	Une cellule neuronale vue par un microscope à contraste de phase, [Kim00].	29
2.16	Exemple d'une image MET d'une cellule avec une résolution de 3.4 nm.	30
2.17	Exemple d'une image provenant d'un MEB d'une fibre de polyester avec un grossissement de 1 500×.	31
2.18	Topographie d'une surface de silicium obtenue par AFM, image réalisée sur la station «AMIS» du laboratoire AS2M de l'institut Femto-St, [Par08].	32
2.19	Image par microscopie à effet tunnel de la molécule à six "pattes" sur une surface de cuivre, Université Libre de Berlin.	32
2.20	Schéma du fonctionnement d'un microscope à force atomique.	32
2.21	Schématisation d'un microscope photonique de base.	34
2.22	Illustration de la faible profondeur de champ d'un microscope optique à 10×.	36
2.23	Illustration du faible champ de vision d'un microscope optique.	37
2.24	Illustration de la faible distance de travail d'un microscope photonique à 10×.	39
2.25	Illustration du problème lié à la faible distance de travail.	39
2.26	Séquence d'images représentant le changement du contraste sur un micro-objet en silicium lors de sa manipulation.	40
2.27	Changement du contraste d'une pièce de silicium pour différentes orientations : tangage $[0^\circ \rightarrow 15^\circ]$ et roulis $[0^\circ \rightarrow 50^\circ]$.	41
2.28	Inversion de l'importance des forces dans le micromonde [Fea95].	43
2.29	Illustration de l'origine des forces capillaires.	44
3.1	Notation des différents repères.	52
3.2	Système de coordonnées sur la matrice CCD.	54
3.3	Le microscope optique MZI6A de marque Leica.	56
3.4	Mire virtuelle obtenue par des déplacements d'une pointe AFM, [AFF05].	59
3.5	Cahier des charges pour la conception de la mire 2D.	60
3.6	Photographie de la mire réelle en silicium.	60
3.7	Détection des coins de chaque motif de la mire en silicium.	61
3.8	Construction de la mire virtuelle 2D.	62
3.9	Ensemble des points \mathbf{P}_w obtenus (mire virtuelle 2D).	63
3.10	Estimation du point principal.	66
3.11	Photographie de la mire à trois trous.	67
3.12	Mire pour établir la relation entre f et la valeur du zoom ζ .	67
3.13	Courbe qui relie la quantité $k.f$ à ζ (courbe expérimentale).	68
3.14	Courbe qui relie la quantité $k.f$ à ζ (courbe d'interpolation).	68
3.15	Microscope optique	69
4.1	Illustration d'une saisie parfaite d'un micro-objet planaire avec un gripper incliné à 45° .	75
4.2	Modèle CAO (Conception assistée par ordinateur) de la station de micro-assemblage PRONOMIA.	78
4.3	Courbe représentant les différentes méthodes d'estimation du focus.	79

4.4	Illustration du fonctionnement de l'autofocus sur la station SAMMI. . . .	80
4.5	Illustration de courbe de focus obtenue.	81
4.6	Représentation de la position des éléments (caméra, micropince et porte-échantillon) sur la station SAMMI.	81
4.7	Boucle de commande assurant le suivi du système de gripping par le microscope optique.	82
4.8	Séquence d'images qui montre un mouvement du gripper en forme de "U" inversé. La focalisation est toujours maintenue sur le gripper.	83
4.9	Logiciel de pilotage du microscope photonique de la station SAMMI. . . .	84
4.10	Séquence montrant le déplacement de zone de netteté sur les doigts de la pince pendant le scan.	86
4.11	Illustration du choix de la netteté du même pixel sur l'ensemble des images.	86
4.12	Représentation de la variance du même pixel sur une séquence d'images. . .	86
4.13	Pixels à fort degré de netteté sur une image de la séquence.	87
4.14	Allure de la courbe de la variance obtenue expérimentalement.	88
4.15	Quelques résultats des deux étapes (lissage et filtrage) des courbes expérimentales de la variance sur certains pixels de l'image.	89
4.16	Pixels à fort degré de netteté sélectionnés après un filtrage gaussien. . . .	89
4.17	Illustration des axes principaux de la distribution des pixels détectés. . . .	90
4.18	Représentation des pixels jugés nets par les deux méthodes de filtrage. . .	90
4.19	Reconstruction 3D des doigts de la micropince, visualisation " <i>Matlab</i> ". . .	92
4.20	Séquence d'images d'un micro-objet vue par un microscope optique inversé (40×).	92
4.21	Zoom sur une partie du micro-objet reconstruit.	92
4.22	Approximation de la pose des doigts de la micropince par des segments de droites.	93
4.23	Représentation azimutale α et élévation β d'un doigt dans l'espace. . . .	94
4.24	Différence entre une saisie maîtrisée (avec des doigts alignés) et une saisie complètement ratée (doigts non alignés).	95
5.1	Boucle d'asservissement visuel.	102
5.2	Look and move (Asservissement en situation).	104
5.3	Asservissement visuel.	106
5.4	Exemple d'utilisation du fibroscope en micromanipulation.	112
5.5	micro-eolienne assemblée par l'équipe de Dechev.	112
5.6	3D semi-conducteur crysto-photonique assemblé.	113
5.7	Modèle d'une caméra.	117
5.8	Schéma bloc de l'asservissement visuel multi-échelle.	119
5.9	Schéma de la commande en fermeture de la micropince.	120
5.10	Station de micro-assemblage SAMMI.	122
5.11	Photographie plus large de la station SAMMI.	123
5.12	Exemples de microstructures.	124
5.13	Cycle de pick and place automatisé présenté sous forme d'un <i>Grafcet</i>	126

5.14	Séquence d'images prise sur un cycle de pick and place d'un micro-objet en silicium.	128
5.15	Illustration de la précision sub-pixellique lors d'un positionnement.	128
5.16	Commande en fermeture de la micropince par retour visuel.	129
5.17	Évolution des erreurs e_x , e_y et e_θ lors du positionnement d'un micro-objet à une position désirée.	129
5.18	Évolution des erreurs e_1 et e_2 lors de la fermeture des doigts de la pince.	130
5.19	Illustration de la planification de trajectoire.	133
5.20	Illustration des champs de potentiels simulés.	134
5.21	Quelques résultats expérimentaux sur la planification et le suivi de trajectoires.	137
5.22	Exemple d'un suivi de trajectoire montrant la phase initialisation, suivi et relâchement de la contrainte suivi.	138
5.23	Microfibre optique.	139
5.24	Application du SIFT sur un positionnement automatique d'une microfibre optique.	140
6.1	Schéma représentant les repères liés à la caméra et aux micro-objets à assembler.	148
6.2	Représentation des trois tâches essentielles en micro-assemblage.	150
6.3	Schéma bloc de la commande avec une approche "single tracking". \mathbf{S}_A , \mathbf{S}_A^* sont respectivement la position désirée et la position courante du micro-objet A.	152
6.4	Méthode de détermination de la position ${}^{\mathcal{F}}\mathbf{M}_c$ du repère caméra dans le repère fixe $\mathcal{R}_{\mathcal{F}}$	154
6.5	Le modèle CAO d'un des micro-objets à assembler.	161
6.6	Distance point-droite.	162
6.7	Illustration du fonctionnement du tracker sur un microcomposant.	162
6.8	Nouvelle configuration de la station de micro-assemblage SAMMI.	164
6.9	Nouvel imageur sur la station SAMMI.	164
6.10	Photographie de la scène durant le troisième micro-assemblage.	165
6.11	Séquence d'images prises durant l'assemblage de deux microcomposants sur deux niveaux par l'approche PBVS (approche single tracking).	167
6.12	Dual tracking.	168
6.13	Schéma bloc de la loi de commande avec un dual tracking.	169
6.14	Séquence d'images d'un micro-assemblage en utilisant l'approche dual tracking.	170
6.15	Évolution des erreurs relatives (e_x , e_y et e_θ) lors de la commande des 3 ddl de la plateforme de positionnement.	171
6.16	Évolution des erreurs relatives (e_z et e_ϕ) lors de la commande des 2 ddl du micromanipulateur.	171
6.17	Assemblage réalisé de manière automatique et visualisé sous le MEB.	172
6.18	Trajectoire en ligne droite entre la position initiale et la position finale.	173
6.19	Illustration de l'assemblage visé avec des pièces macrométriques.	173

6.20	Repères liés à chaque micro-objet à assembler.	174
6.21	Micro-assemblage réalisé en mode télé-opéré.	175
6.22	Phase intermédiaire d'un micro-assemblage complexe.	176
6.23	Séquence d'images acquises durant l'assemblage d'un MEMS complexe sur trois niveaux par l'approche PBVS.	179
6.24	Illustration de la solidité d'un assemblage (sans solidarisation) de deux microcomposants.	180
6.25	Photographie du système de collage à UV.	181
6.26	Intégration du système de collage à UV sur la station SAMMI.	181
7.1	Futur design du gripper MMOC équipé d'une microcaméra embarquée. . .	187
7.2	Micromanipulateur (Kleindiek) à 3 ddl à l'intérieur d'un MEB.	188
7.3	Tracking d'un micro-objet sous le MEB.	189

Liste des tableaux

2.1	Tableau des caractéristiques des objectifs Mitutoyo Plan à longue distance de travail, [Ber07].	41
3.1	Spécificités des axes équipant la plateforme de positionnement.	61
3.2	Résultats du calibrage pour une position du zoom à 38 (grandissement $\zeta = 3.8\times$).	70
5.1	Spécifications des axes de translation et de rotation.	121
5.2	Spécifications des organes terminaux en nickel.	123
5.3	Résultats choisis pour représenter les différents scénarios rencontrés lors de la validation.	131
5.4	Résumé des résultats en précision	132
6.1	Quelques micro-assemblages réalisés par l'approche PBVS (single tracking).166	
6.2	Quelques micro-assemblages réalisés par l'approche PBVS (approche dual tracking).	169

List of Algorithms

1	Algorithme de reconstruction 3D des doigts d'une micropince.	85
2	Structure de l'algorithme utilisé pour l'assemblage d'un MEMS complexe. .	177

Notations

Règles générales

a	: scalaire
\mathbf{a}	: vecteur
\cdot	: produit scalaire
\otimes	: produit vectoriel
\mathbf{A}	: matrice
\mathbf{A}^\top	: transposée de la matrice \mathbf{A}
\mathbf{A}^{-1}	: inverse de la matrice \mathbf{A}
$\det(\mathbf{A})$: déterminant de la matrice \mathbf{A}
Med	: valeur médiane
$\mathbf{0}_{n \times m}$: matrice nulle de dimension $n \times m$
$\mathbf{I}_{n \times m}$: matrice identité de dimension $n \times m$
$ a $: valeur absolue de a
$\ \mathbf{a}\ $: norme du vecteur \mathbf{a}
\mathcal{R}	: désigne un repère
\propto	: opérateur d'égalité au facteur d'échelle près
$\mathbf{a} \circ \mathbf{b}$: opérateur de composition de a avec b
I	: image courante
I^*	: image désirée
$i \times j$: dimension (hauteur et largeur) de l'image I

Notations introduites dans le chapitre [\[2\]](#)

C_{total}	: coût total d'un micro-assemblage
C_f	: coût du feeding des microcomposants
C_a	: coût de l'assemblage des microcomposants
T_{total}	: temps total nécessaire pour un micro-assemblage
T_{pos}	: temps nécessaire pour positionner un microcomposant
T_{ins}	: temps nécessaire pour insérer deux microcomposants
Y_i	: taux de conformité du composant i
ON	: ouverture numérique d'un objectif
Γ	: grandissement d'un microscope optique
n	: indice de réfraction d'un milieu
λ	: longueur d'onde du rayonnement d'une source lumineuse
e	: résolution d'un capteur CCD
T_s	: taille d'un capteur CCD
f_o	: longueur focale de l'objectif
f_c	: longueur focale de l'oculaire
a_o	: distance minimale de mise au point
α_o	: angle d'ouverture d'un objectif
d	: distance du travail d'un microscope optique
C_I	: contraste de l'image I
$w(r)$: force de Van der Waals
r	: distance d'interaction entre deux corps
ξ	: distance interatomique
τ	: profondeur d'un potentiel
C_{ind}	: phénomène d'induction
C_{orient}	: phénomène d'orientation
C_{disp}	: phénomène de dispersion
γ	: tension de surface
V	: volume molaire
E	: champ électrique
σ	: densité de charge surfacique
q	: charge électrique
F	: force induite par le champ électrique E

D	: distance entre deux particules chargées
ϵ	: constante diélectrique

Notations introduites dans le chapitre [3]

\mathcal{R}^3	: espace 3D
\mathcal{R}^2	: espace 2D
\mathbf{D}	: matrice des paramètres intrinsèques et extrinsèque d'une caméra
\mathbf{K}	: matrice de paramètres intrinsèques d'une caméra
\mathbf{R}	: matrice de rotation
\mathbf{T}	: vecteur de translation
$\mathcal{R}_w(X_w, Y_w, Z_w)$: repère monde
$\mathcal{R}_c(X_c, Y_c, Z_c)$: repère caméra
$\mathcal{R}_I(o, u, v)$: repère image
$\mathcal{R}_r(x, y, z)$: repère rétinien
P_w	: point 3D dans le repère \mathcal{R}_w
P_c	: point 3D dans le repère \mathcal{R}_c
f	: longueur de la focale d'une caméra
lt	: longueur du tube d'un microscope optique
s	: facteur multiplicatif
$P_p = (x_o, y_o)$: point principal
k_x, k_y	: facteurs d'échelle respectifs suivant x et y
d_x, d_y	: dimensions respectives suivant x et y d'un pixel
θ	: angle entre les axes u et v du repère image
s_x	: rapport d'échelle entre la surface du capteur CCD et la mémoire tampon de la carte d'acquisition I
ζ	: facteur zoom
d	: distance de travail d'un microscope optique
M	: grandissement d'un microscope optique
C_{nor}	: auto-corrélation normalisée
α	: angle de rotation autour de l'axe x
β	: angle de rotation autour de l'axe y
γ	: angle de rotation autour de l'axe z

Notations introduites dans le chapitre [4]

$i(x, y)$: intensité du pixel (x, y)
$ L(x, y) $: valeur absolue d'une convolution de I avec un opérateur Laplacien L
W_{lrln}	: ondelette d'une région de dimension $lr \times ln$
$h(i)$: histogramme d'une image
μ	: moyenne des intensités d'une image
v_n	: degré de netteté
F	: valeur du focus
z_{g-m}	: distance verticale entre l'objectif et le système de préhension
z_{o-g}	: distance verticale entre le micro-objet et le système de préhension
$V(x, y)$: variance du pixel (x, y)
n	: taille du masque de la variance
$I(i, j)$: valeur en niveau de gris du pixel (i, j)
$\overline{I(x, y)}$: moyenne des niveaux de gris dans un voisinage $n \times n$ autour du pixel (x, y)
$s(i)$: valeur de $y(i)$ après filtrage
$dist$: pas de scan
σ	: écart type
α	: angle du roulis
β	: angle du tangage
δ	: paramètre de réglage du filtre gaussien
$b = (x_b, y_b)$: coordonnées du barycentre b

Notations introduites dans le chapitre [5]

\mathbf{r}	: situation courante
\mathbf{r}^*	: situation désirée
\mathbf{s}	: informations visuelles courantes
\mathbf{s}^*	: informations visuelles désirées
\mathbf{e}	: erreur entre une position courante \mathbf{s} et une position désirée \mathbf{s}^*
$\dot{\mathbf{s}}$: vitesse des \mathbf{s}
\mathbf{L}_s	: matrice d'interaction associée à \mathbf{s}

\mathbf{v}	: torseur cinématique d'une caméra
Z	: profondeur de la scène
\mathbf{J}	: modèle géométrique direct d'un robot
q	: coordonnées articulaires d'un robot
\dot{q}	: variation des coordonnées articulaires q
\mathbf{C}	: matrice de combinaison
λ	: facteur de réglage de la vitesse de décroissance de \mathbf{e}
λ_{adp}	: facteur de réglage adaptatif de la vitesse de décroissance de \mathbf{e}
$\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}$: approximation de la matrice d'interaction $\mathbf{L}_{\mathbf{s}}$
$\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}^+$: matrice inverse approximée de la matrice $\mathbf{L}_{\mathbf{s}}$
H	: matrice de transformation projective
W	: fenêtre de tracking
U_{g1}, U_{g1}	: commandes associées respectivement aux doigt inférieur et doigt supérieur du gripper
\mathbb{Q}	: espace de configurations
$U(q(x, y, t))$: champs potentiels
U_{att}	: champ artificiel attractif
U_{rep}	: champ artificiel répulsif
q	: particule soumise à un champ de potentiel
$F(x, y, t)$: force induite par les champs de potentiel
ρ_0	: distance d'influence des pixels obstacles
$B_n^i(t)$: polynôme de Bernstein de degré n
Δ	: pas de déplacement de la position désirée sur la courbe
$M(x, y)$: module d'un point d'intérêt SIFT
$\theta(x, y)$: orientation d'un point d'intérêt SIFT

Notations introduites dans le chapitre [6]

\mathbf{P}	: point 3D
${}^a\mathbf{M}_b$: matrice de transformation rigide d'un repère \mathcal{R}_a vers un repère \mathcal{R}_b
${}^a\mathbf{R}_b$: matrice de rotation entre un repère \mathcal{R}_a vers un repère \mathcal{R}_b
${}^a\mathbf{t}_b$: vecteur de translation entre un repère \mathcal{R}_a vers un repère \mathcal{R}_b
$\theta\mathbf{u}$: rotation θ portée par l'angle \mathbf{u}

$\mathcal{R}_{\mathcal{F}}$: repère fixe lié à la base du robot
${}^c\mathbf{M}_a$: position 3D de \mathbf{a} dans le repère caméra \mathcal{R}_c
${}^a\mathbf{M}_{a^*}$: erreur à réguler à zéro entre la position i et la position i^*
\mathcal{R}_o	: repère lié à la position initiale de la mire d'auto-calibrage
\mathbf{L}_ω	: matrice d'interaction 3D
\mathbf{D}	: matrice diagonale des poids
N	: nombre d'informations visuelles \mathbf{s}
ψ	: fonction robuste
C	: facteur de proportionnalité de la fonction de Tukey
$d_\perp(\mathbf{p})\mathbf{l}(\mathbf{r})$: distance orthogonale entre \mathbf{p} et $\mathbf{l}(\mathbf{r})$
\mathbf{p}^t	: pixel (point) à l'instant t
\mathbf{p}^{t+1}	: pixel (point) à l'instant $t + 1$
$\mathbf{l}(\mathbf{r})$: droite
${}^c\mathbf{M}_{a^*}^{b^*}$: matrice de passage entre deux positions \mathbf{a} et \mathbf{b} exprimée dans \mathcal{R}_c

Abréviations

Liste des abréviations par ordre alphabétique

2D	: deux dimensions
2D1/2	: deux dimensions et demie
3D	: trois dimensions
ACP	: Analyse en Composantes Principales
AFM	: Microscope à Force Atomique
AV2D	: Asservissement 2D
AV2D1/2	: Asservissement Visuel 2D1/2
AVd2D/dt	: Asservissement Visuel d2D/dt
AV3D	: Asservissement Visuel 3D
BioMEMS	: Biomedical Micro-Electro-Mechanical System
CAO	: Conception Assistée par Ordinateur
CCD	: Charge-Coupled Device
<i>CdV</i>	: Champ de Vision
ddl	: degrés de liberté
DLT	: Direct Linear Transform
ESM	: Efficient Second-order Minimization
HYDROMEL	: Hybrid Ultra Precision Manufacturing Process Based on Positional and Self assembly for Complex Micro-Products
IBVS	: Image-based Visual Servoing
LED	: Light-Emitting Diode

MEB	: Microscope à Balayage Électronique
MET	: Microscope Électronique par Transmission
MEBT	: Microscope à Balayage Électronique par Transmission
MEMS	: Micro-Electro-Mechanical System
MGD	: Modèle Géométrique Direct
MGDI	: Modèle Géométrique Direct Indirect
MMOC	: Microprehensile Microrobot On Chip
MOEMS	: Micro-Opto-Electro-Mechanical System
MST	: Biomedical MicroSystem Technology
NEMS	: Nano-Electro-Mechanical System
PBVS	: Pose-based Visual Servoing
<i>PdC</i>	: Profondeur de Champ
pH	: potentiel Hydrogène
PRONOMIA	: PRincipe et Outils NOuveaux pour le Micro-assemblage Automatisé
ROI	: Region Of Interest
PZT	: Titano-Zirconate de Plomb
SAMMI	: Systèmes Automatisés de Micromanipulation et Micro-assemblage
SIFT	: Scale-Invariant Feature Transform
SNOM	: Near-field scanning optical microscopy
STM	: Scanning Tunneling electron Microscope
UV	: Ultra-Violet
VISP	: VIsual Servoing Platform
VVP	: Virtual Visual Servoing

Publications personnelles

- Ces travaux de thèse ont conduit à diverses publications. Les travaux publiés apparaissent de la manière suivante :

- le chapitre **3** est décrit dans [1] et [6],
 - le chapitre **4** est décrit dans [7],
 - le chapitre **5** est décrit dans [1], [2], [4] et [5],
 - le chapitre **6** est décrit dans [3], [8] et [9],
-

- Journaux internationaux à comité de lecture

[1] - **B. Tamadazte**, S. Dembélé and Nadine Le-Fort Piat, *A Multiscale Calibration of a Photon Video Microscope for Visual Servo Control : Application to MEMS Micromanipulation and Microassembly*, In Sensors and Transducers Journal (special issue in Robotic and Sensors Environments), vol. 5, (March, 2009), pp. 37-52 (**16 pages**).

[2] - **B. Tamadazte**, S. Dembélé, Nadine Le-Fort Piat and G. Fortier, *Robotic Micromanipulation for Microassembly : Modelling by Sequential Function Chart and Achievement by Multiple Scale Visual Servoings*, Journal of Micro-Nano Mechatronics", DOI : 0.1007/s12213-009-0019-0, (**21 pages**).

[3] - **B. Tamadazte**, IEEE Member, N. Le Fort-Piat, IEEE Member, and S. Dembélé *Robotic Micromanipulation and Microassembly using Mono-view and Multi-scale Visual Servoing*, IEEE-ASME Transaction on Mechatronics, (minor revisions), (**10 pages**).

[4] - **B. Tamadazte**, E. Marchand, Nadine Le-Fort Piat and S. Dembélé *A Visual servoing scheme for 3D MEMS microassembly*, International Journal of Robotic Research, (submitted, March 2009), (**29 pages**).

- Conférences internationales avec actes et à comité de lecture

[5] - **B. Tamadazte**, S. Dembélé, G. Fortier, and N. Le Fort-Piat, «*Automatic Micromanipulation using Multiscale Visual Servoing*», IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, (Washington, USA), (August, 2008), pp. 977-982.

[6] - **B. Tamadazte**, S. Dembélé, and N. Le Fort-Piat, «*A Multiscale Calibration of a Photon Video Microscope for Visual Servo Control : Application to Micromanipulation*»,

IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments (ROSE), (Ottawa, Canada), (October 2008), pp. 29-34.

[7] - G. Fortier, **B. Tamadazte**, S. Dembélé, and N. Le Fort-Piat, «*Estimating the 3D Orientation of a Microgripper by Processing the Focus Data from the Images Delivered by a Videomicroscope*», IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments (ROSE), (Ottawa, Canada), (October 2008), pp. 58-63.

[8] - **B. Tamadazte**, T. Arnould, S. Dembélé, N. Le Fort-Piat and E. Marchand, «*Real-time Vision-Based Microassembly of 3D MEMS*», IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, (Singapore), (14-17, July, 2009), pp. 88-93.

[9] - **B. Tamadazte**, N. Le Fort-Piat, E. Marchand and S. Dembélé, «*Microassembly of Complex and Solid 3D MEMS by 3D Vision-based Control*», IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (Saint-Louis, USA), (October, 2009), pp. 3284-3289.

- Colloques nationaux

[10] - **B. Tamadazte**, S. Dembélé, B. Ballarin and N. Le Fort-Piat, «*Microassemblage par Asservissements Visuels*», Dans 6èmes Journées Nationales de la Recherche en Robotique, JNRR'07, (Obernai, France), (octobre, 2007).

[11] - **B. Tamadazte**, S. Dembélé, B. Ballarin and N. Le Fort-Piat, «*Microassemblage par Asservissements Visuels*», Ateliers LEA d'Arc et Senans, (France), (septembre, 2007).

- En cours de soumission

[12] - **B. Tamadazte**, S. Dembélé and N. Le Fort-Piat, «*Trajectory Planning for Vision Feedback Control : Applications to MEMS and MOEMS micromanipulation*».

Introduction générale

La révolution du microsystème est là. De plus en plus, on nous parle de prouesses technologiques : téléphone portable dernière génération, petit de taille mais grand par le nombre de fonctions intégrées, ce qui était tout simplement inimaginable il y a seulement quelques années ; des microcaméras autonomes de la taille d'une simple pilule qu'on avale et qui scanne l'anatomie de notre corps ; des matrices intelligentes de micro-aiguilles d'insuline ; d'innombrables microcapteurs ou micro-actionneurs présents que ce soit dans les grandes industries telles l'aérospatiale, l'automobile ou dans notre vie quotidienne. La question, qui se pose alors est : qu'est-ce qu'un microsystème ? Un microsystème (FIG. 1.1) est d'abord un système électromécanique comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques, utilisant l'électricité comme source d'énergie, en vue de réaliser une fonction de capteur ou d'actionneur avec au moins une structure présentant des dimensions micrométriques. La fonction principale de ce microsystème doit être assurée par la structure micrométrique. Dans la plupart des cas, l'aboutissement à un microsystème fonctionnel passe par une phase dite d'assemblage. C'est à ce niveau là que réside le verrou, c'est-à-dire comment procéder pour assembler les différents éléments qui composent un microsystème ? Et avec quels moyens ? Le micro-assemblage constitue le verrou même de cette nouvelle thématique, qui gravite autour du développement des microsystèmes. Le micro-assemblage intègre obligatoirement des tâches de micromanipulation. La production de micro-produits nécessite de maîtriser les étapes (tâches) de micromanipulation et de micro-assemblage.

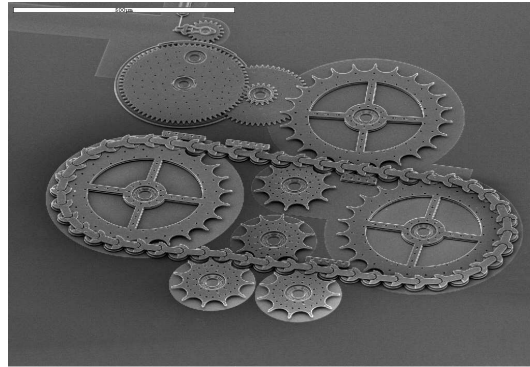


FIG. 1.1 – Exemple d'un microsysteme.

C'est dans le département d'Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques (AS2M), ex LAB ¹, de l'institut FEMTO-ST² de Besançon que s'est déroulée cette thèse (effectuée du 1 février 2007 au 30 septembre 2009). Les recherches du département AS2M sont depuis plus d'une décennie fondées sur l'automatique, la microrobotique, la mécatronique, pour le groupe SAMMI ³ et le génie industriel pour le groupe COSMI ⁴. Dans le premier groupe et plus précisément la partie micro-robotique, les efforts déployés sont essentiellement concentrés sur la conception, le développement de systèmes (plateformes) de micromanipulation et de micro-assemblage et leur automatisation. C'est l'émergence de la recherche autour de la microrobotique au milieu des années 1990, qui a permis d'envisager d'autres façons de produire de véritables microsystemes. La maîtrise déjà acquise dans le domaine de la microfabrication des éléments de géométrie variée composant un système micrométrique et les dernières avancées en terme de recherche en microrobotique, donnent la possibilité d'assembler des microsystemes plus complexes, plus petits, plus précis, etc...

Les premiers travaux répertoriés dans la littérature en termes de développement de machines de micro-assemblages (connues sous le nom de micro-usines) concernent le développement de moyens de préhension. Ces systèmes de préhension ⁵ actionnés de manière automatique ont donné la naissance aux premiers assemblages réalisés en mode télé-opéré (à l'aide d'une interface telle qu'un joystick), mais peu de travaux sur la micromanipulation et le micro-assemblage automatisés. Ceci est dû à l'énorme difficulté à développer des approches automatisées. Automatiser un système exige la présence d'un capteur ou de capteurs délivrant des informations ciblées (sur l'effecteur du robot ou sur l'objet à saisir) ainsi que sur son environnement. En macrorobotique, pour acquérir ces informations, plusieurs capteurs peuvent être envisagés : caméra, radar, sonar, odomètre,

¹Laboratoire d'Automatique de Besançon

²Franche-Comté Électronique, Mécanique, Thermique et Optique - Sciences et Technologies

³Systèmes Automatisés de Micromanipulation et Micro-assemblage

⁴COncception et Sûreté de fonctionnement des systèmes MécatronIques

⁵Gripping systems, de l'anglais

... À l'échelle micrométrique, le choix du capteur se limite souvent à celui de la vision, plus précisément à un capteur de vision microscopique.

Les travaux inscrits dans ce manuscrit gravitent autour de ces nouvelles thématiques que sont la microvision et la commande par asservissements visuels pour la micromanipulation et le micro-assemblage. Cette thèse est clairement identifiée dans l'axe de la perception et de la commande pour la microrobotique et constitue une première au sein du département AS2M sur la commande par asservissements visuels. Elle a permis également de dégager des développements dans différents domaines tels que : le calibrage de microscope photonique, les techniques de "depth-from-focus"⁶ et "pose-from-focus"⁷, l'asservissement visuel 2D pour la micromanipulation et l'asservissement 3D pour le micro-assemblage, etc. L'ensemble des travaux réalisés rentrent dans le cadre du projet HYDROMEL détaillé ci-dessous.

1.1 Contexte

Dans un premier temps, nous présentons le projet HYDROMEL à travers son organisation, son cahier des charges, ses objectifs scientifiques et industriels dans le domaine de l'assemblage de MEMS à petite et moyenne série. Ensuite, nous aborderons les parties, nous concernant plus étroitement, que sont la vision 3D et l'asservissement visuel.

1.1.1 Le projet HYDROMEL



HYDROMEL est l'acronyme anglo-saxon du projet intitulé «Procédé de fabrication hybride ultra précis basé sur l'auto-assemblage et l'assemblage positionnel pour des micro-produits complexes». Il a été lancé le 1^{er} octobre 2006 pour une durée de 4 ans avec pour objectif de faire de l'Europe le chef de file mondial dans le domaine de l'assemblage des MEMS. Le projet HYDROMEL regroupe neuf pays européens : la Suisse, l'Allemagne, l'Autriche, l'Italie, la Bulgarie, l'Angleterre, l'Irlande, la Finlande et enfin la France. L'objectif est d'assembler les meilleurs laboratoires européens et les meilleurs partenaires de Recherche et Développement (R&D) dans les domaines de la microrobotique et de l'auto-assemblage. Pour cela, 24 partenaires travaillent ensemble sur la problématique de l'assemblage automatique de composants micrométriques (FIG. 1.2). La France est représentée par 6 partenaires : BIOPREDIC, CEA, ST, ALMA, AT SAS et le CNRS. Le porte-drapeau au niveau du CNRS est l'institut FEMTO-ST à travers le département d'Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques (AS2M). Le département AS2M intervient sur plusieurs volets du projet HYDROMEL tels que : le gripping⁸, l'in-

⁶profondeur à partir du focus

⁷forme à partir du focus

⁸système de préhension

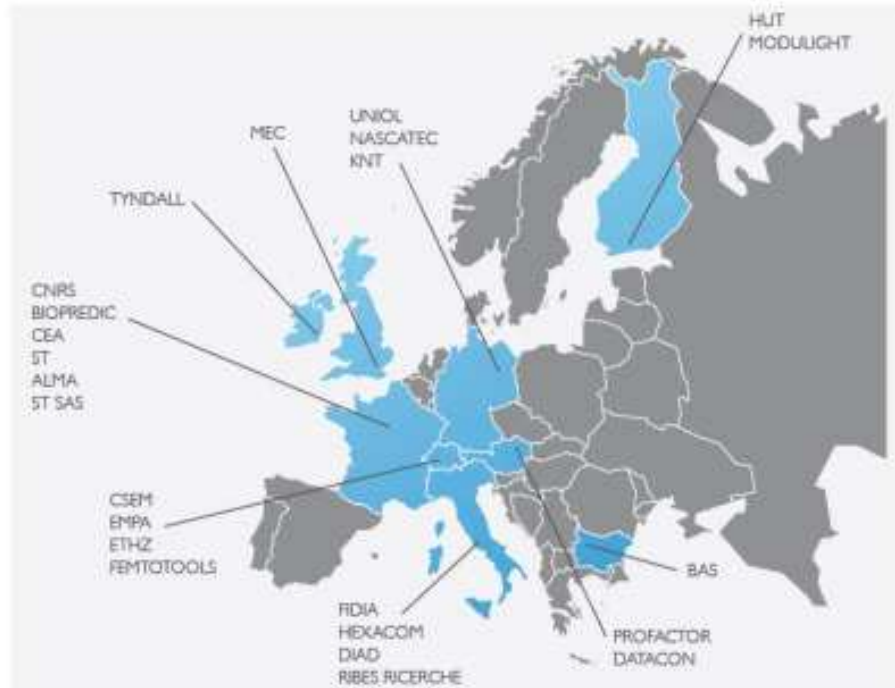


FIG. 1.2 – Illustration des pays européens ainsi que des partenaires impliqués dans le projet HYDROMEL.

tégration de capteur d'efforts, la fonctionnalisation de surfaces, le feeding ⁹, le développement d'actionneurs à haute précision, le self-learning ¹⁰, la vision 3D et l'asservissement visuel 2D et 3D. Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit se rapportent à ces deux dernières contributions.

1.2 Motivations

Le projet HYDROMEL vise à mettre au point de nouveaux systèmes de production 3D flexible automatisé avec une précision de positionnement de 100 *nm* pour l'assemblage de micro-dispositifs. Ces systèmes seront basés sur l'utilisation de structures robotiques ultra-précises et sur la mise en œuvre de techniques d'auto-assemblage. Cette combinaison innovante entre l'assemblage robotique et l'auto-assemblage ¹¹ apportera une plus-value à la stratégie d'assemblage de microproduits finis.

La démarche empruntée pour développer ces nouveaux systèmes de production repose sur l'association de l'approche robotique, où les micro-objets sont manipulés mécaniquement et placés un par un et l'approche self-assembly (organisation autonome

⁹approvisionnement en objets

¹⁰auto-apprentissage

¹¹self-assembly, de l'anglais

des microcomposants en structures sans l'intervention d'un opérateur) où cette fois-ci les objets sont classés et organisés par des structures physiques et des interactions chimiques (FIG. 1.2). Cette association entre les deux approches n'a jamais été abordée ni par les industriels, ni par les laboratoires de recherche. Ainsi, en plus de la nouveauté apportée par la combinaison du self-assembly et de l'assemblage robotisé, l'objectif du projet HYDROMEL concerne aussi le transfert dans l'industrie des approches basées auto-assemblage. Par conséquent, l'Europe se veut être le chef de file pour le développement d'outils d'assemblage hybrides, flexibles et modulaires entièrement automatisés pour l'assemblage de microproduits à haute précision et la production de microsystèmes à petites et moyennes séries.

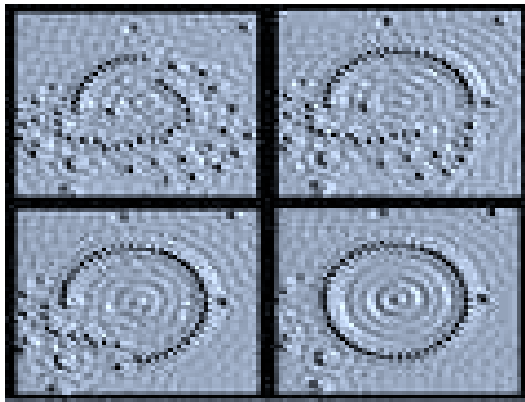


FIG. 1.3 – Auto-assemblage.

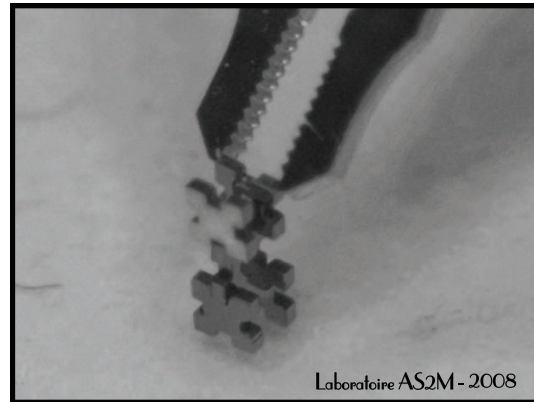


FIG. 1.4 – Assemblage robotique.

À la fin du quadriennal, HYDROMEL devrait répondre aux exigences dans une vaste gamme d'applications et, par conséquent, dynamiser les marchés existants et en ouvrir de nouveaux qui jusqu'à aujourd'hui sont bloqués par des contraintes liées à la précision, la modularité, la flexibilité, la répétabilité, la reconfigurabilité ... des systèmes de production. L'association des 24 partenaires issus de différents pays européens devrait conduire à une augmentation de la compétitivité interne (entre les partenaires) et externe (avec d'autres laboratoires ou industriels asiatiques ou américains) sur des marchés innovants. Les disciplines visées sont la mécanique, l'électronique, la génie biologique, la microfluidique et l'informatique.

1.2.1 Organisation du projet HYDROMEL

Pour une meilleure gestion des compétences des différents partenaires (laboratoire et industriels), HYDROMEL est structuré en 5 parties appelées également **démonstrateurs** (FIG. 1.5).

Chaque démonstrateur regroupe une thématique de recherche bien définie. Le démonstrateur 1 est orienté mécanique, le démonstrateur 2 est lié à l'électronique, le démonstrateur 3 est dédié au génie biologique, le démonstrateur 4 est orienté microfluidique et enfin le démonstrateur 5 est consacré à l'informatique. HYDROMEL est structuré également

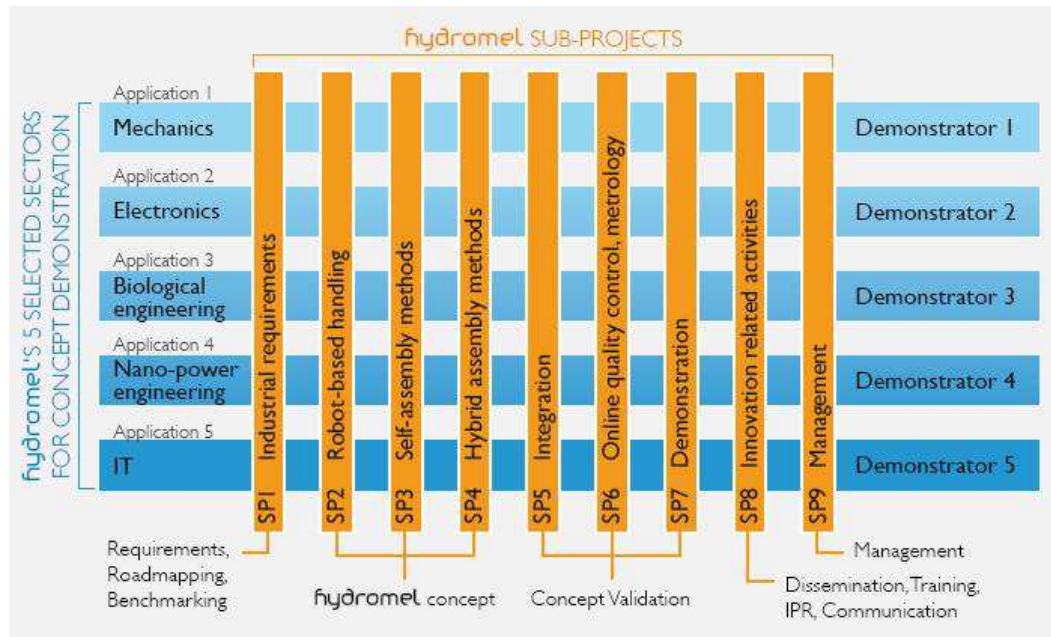


FIG. 1.5 – La structuration du projet HYDROMEL.

selon une décomposition transversale aux 5 démonstrateurs (disciplines) constituée de **Sous-Projets**. Nous dénombrons au total 9 sous-projets (SP).

1.3 Objectifs scientifiques d'HYDROMEL

Les objectifs du projet HYDROMEL sont représentés en trois groupes. Dans un premier temps, les retombées attendues du projet au niveau scientifique et industriel doivent être visibles au cours du projet (objectifs à court terme). Ensuite, vers la fin du projet, c'est-à-dire après l'intégration des différents apports de tous les partenaires et les démonstrateurs finalisés, l'Union Européenne visera à se positionner en chef de file dans le domaine de l'assemblage de microsystemes complexes (3D) à haute précision (objectifs à moyen terme). Enfin, le transfert du savoir-faire des universités et laboratoires européens dans le domaine du micro-assemblage vers l'industrie demeurera l'objectif phare de ce projet (objectifs à long terme).

1.3.1 Objectifs à court terme

Les objectifs à court terme sont de mettre en avant les compétences des partenaires dans le cadre de l'amélioration des approches de manipulation robotiques en terme de précision, de flexibilité (changeur d'outils, capteurs, etc.), de fiabilité et bien évidemment de réduction du temps d'installation d'une production optimale pour atteindre un rendement donné. En ce qui concerne l'auto-assemblage, les objectifs attendus à court

terme sont des connaissances étendues dans le traitement de surfaces, la reconfigurabilité des surfaces, l'auto-assemblage hiérarchique ainsi que sur la modélisation des forces qui régissent le micromonde.

1.3.2 Objectifs à moyen terme

Des résultats sont attendus pour l'évaluation de la compatibilité des approches d'assemblage robotiques et d'auto-assemblage. S'il y a convergence entre les deux, la fabrication d'objets complexes (MEMS ¹², NEMS ¹³, MOEMS ¹⁴, BioMEMS ¹⁵, etc.) sera développée et sera basée sur le concept de "robotique-assistée-selfassembly" et de "selfassembly-assistée-robotique".

1.3.3 Objectifs à long terme

Les efforts seront mis sur la partie transfert de l'approche hybride dans l'industrie. Ce transfert reposera sur 5 points majeurs en l'occurrence : la flexibilité, la rentabilité (applicable à une grande variété de matériaux), le positionnement à haute précision, le rythme de production (montage en parallèle d'un grand nombre de parties d'assemblage permettant d'accroître le rendement) et la fiabilité à travers l'intégration des fonctions de contrôle qualité et de métrologie.

1.4 Positionnement du département AS2M dans HYDROMEL

Le département AS2M a une expérience connue et reconnue dans le domaine de la microrobotique et une expertise dans le domaine du micro-assemblage et de la micromanipulation par le biais du développement de différents types de manipulateurs pour une gamme d'objets à manipuler très variée. L'équipe SAMMI (Systèmes Automatisés de Micromanipulation et Micro-assemblage) du département AS2M s'est particulièrement intéressée à la manipulation d'objets en silicium (MEMS), de cellules biologiques (pour des applications médicales) et bien d'autres objets artificiels de taille micrométrique. Deux stations de micro-assemblage ont vu le jour, la station appelée "SAMMI" pour la manipulation et l'assemblage des composants de taille comprise de 100 μm à 1 mm et "PRONOMIA" (Principes et Outils Nouveaux pour le Micro-Assemblage Automatisé) pour des objets de taille plus petite c'est-à-dire entre 10 μm à quelques dizaines de micromètres. Les différents groupes de travail de l'équipe SAMMI ont pour objectifs : l'étude et le développement de méthodes innovantes de conception et de commande permettant la réalisation de stations de micro-assemblage. Les problématiques scientifiques abordées sont présentées ci-dessous :

¹²Micro-Electro-Mechanical System

¹³Nano-Electro-Mechanical System

¹⁴Micro-Opto-Electro-Mechanical System

¹⁵Biomedical Micro-Electro-Mechanical System

- La conception et commande (en statique ou en dynamique) d'actionneurs à haute précision basés sur des matériaux actifs : alliages à mémoire de forme (AMF), matériaux piézoélectriques, bilames thermiques. Des problèmes de modélisation et de commande optimale sont traités compte-tenu du comportement non linéaire de ces types de matériaux,
- La maîtrise de la dynamique du micromonde. Il s'agit de l'étude du comportement dynamique des objets de dimensions micrométriques essentiellement régi par les forces surfaciques,
- L'Automatisation des systèmes microrobotiques et des micro-usines ¹⁶. Il s'agit à la fois de traiter les moyens de boucler la commande de systèmes à piloter, c'est-à-dire définir les capteurs et les méthodes de commande à mettre en œuvre. Le problème du développement d'algorithmes de **vision** adaptés au micromonde y est également traité. Il en est de même au sujet de la mesure de position, de déplacement et de force, essentielles pour un contrôle efficace de la micromanipulation et des opérations d'assemblage. Plusieurs approches de commande sont développées : la commande robuste, la commande par apprentissage par renforcement, la **commande référencée vision** (asservissement visuel).

C'est dans ce dernier thème que se positionnent les travaux proposés dans ce manuscrit. C'est-à-dire le développement d'algorithmes de vision allant du traitement d'images basique à la vision 3D, le calibrage et la modélisation de microscope optique et l'asservissement visuel (look & move, asservissement visuel dans l'image et asservissement visuel 3D). Dans la suite de ce chapitre, nous détaillerons davantage l'implication de l'équipe "perception et action" dans le projet HYDROMEL.

1.4.1 Vision 3D

En effet, la vision et plus précisément la vision par microscopie optique est incontournable quand les objets que vous devez manipuler se voient difficilement à l'œil nu. Une première thèse gravitant autour de l'utilisation de la vision pour la micromanipulation a été soutenue au département AS2M, par Julien Bert en 2007 [Ber07]. Celle-ci traitait d'une part, de la construction d'images mosaïques à partir d'un ensemble d'images représentant chacune une petite partie de la scène et d'autre part, d'une technique de transfert trifocal, permettant à partir d'un simple calibrage stéréoscopique faible du microscope optique ou des imageurs, de reconstruire une vue virtuelle à partir de seulement deux vues réelles sans le besoin d'informations 3D explicites. La reconstruction d'une vue panoramique de la scène où l'assemblage s'effectue permet de contourner le problème lié à la limitation du champ de vue en imagerie microscopique et ainsi de résoudre le dilemme grandissement/résolution. Un autre problème majeur directement lié à l'utilisation d'un microscope optique en microvision est l'encombrement de ce dernier, c'est dans cette objectif que s'inscrivait la deuxième partie de la thèse de Julien Bert c'est-à-dire limiter l'utilisation d'imageurs en créant des vues virtuelles utilisées dans la boucle de com-

¹⁶le concept des micro-usines a été introduit par les japonais en 1990

mande.

Nous avons développé d'autres techniques de vision 3D durant cette thèse. Ces travaux de vision 3D concernent les techniques dites de depth-from-focus et pose-from-focus. Elles reposent sur l'utilisation de la faible profondeur de champ dont la microvision souffre pour faire de la reconstruction 3D d'outils (organes terminaux d'un système de préhension) ou des micro-objets à manipuler. Plus précisément, ces approches sont basées sur l'estimation du focus sur une série d'images de la scène prise par un microscope optique. Le chapitre [4] est consacré à ces développements.

1.4.2 Asservissement visuel

Afin de répondre aux exigences en termes de précision et rapidité de positionnement et d'orientation dans les tâches de micromanipulation et de micro-assemblage, des commandes référencées vision ont été étudiées et mises au point durant les trois années de thèse. La commande référencée vision, connue également sous le nom anglo-saxon "Visual Servoing", utilise une information visuelle pour contrôler des mouvements d'un robot. Contrairement à la robotique conventionnelle utilisant une caméra équipée d'un objectif standard, la microrobotique utilise des systèmes de vision à fort grandissement. Dans la plupart des cas, ce système de vision est un microscope photonique. L'utilisation de ce dernier pose quelques problèmes d'utilisation directement liées à ses spécificités comme sa faible profondeur de champ et son faible champ de vision. Ainsi, il est nécessaire de proposer des lois de commande innovantes et adaptées à ce type d'imageur. Pour les besoins du projet HYDROMEL, des lois de commande référencées vision ont été développées. Une loi de commande de type asservissement visuel 2D multi-échelle a été étudiée pour automatiser des tâches de micromanipulation avec une très grande précision. Pour ce qui concerne les tâches de micro-assemblage beaucoup plus complexes, une nouvelle loi de commande de type asservissement visuel 3D a été mise au point. L'ensemble de ces travaux ont été testés et validés sur une plateforme de micro-assemblage à cinq degrés de liberté. Les micro-objets utilisés pour la validation sont divers et variés. Ils peuvent être des composants silicium, de différentes formes et tailles avec des encoches sur les côtés pour les emboîter les uns dans les autres, des microbilles en acier ou encore des microfibres optiques. Des critères de validation tels que la flexibilité, la précision, la répétabilité, la robustesse, le temps de cycle nécessaire pour effectuer une tâche ont été pris en considération. Nous avons démontré l'intérêt des approches proposées par la réalisation de plusieurs cycles de manipulation automatisés ainsi que des assemblages de micro-objets de $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$. Les résultats en terme de précision sont de l'ordre du micromètre sur les axes de translation et de 0.5° sur les axes de rotation. Concernant le temps de cycle, il est estimé, par exemple, à 40 secondes pour un assemblage de micro-objets comportant des opérations de prise, d'orientation, de positionnement et d'insertion. Ces résultats nous permettent de bien nous positionner dans le sous-projet **SP2** d'HYDROMEL.

1.5 Organisation du manuscrit

Ce manuscrit est dédié à un public large. Cependant, certains chapitres apparaissent de façon détaillée notamment ceux traitant des problématiques telles que le calibrage et la modélisation des lois de commande. Mais néanmoins, dans l'ensemble ce manuscrit reste très accessible à la nouvelle communauté travaillant dans les domaines de la microrobotique, et plus précisément, celui orienté micromanipulation et micro-assemblage de MEMS en utilisant différents outils liés à la vision. Le manuscrit est présenté en deux parties regroupant cinq chapitres.

La première partie est consacrée à la micromanipulation et au micro-assemblage, à la vision dans le micromonde, au choix du système de vision à utiliser, à sa modélisation et à son calibrage et au développement d'algorithmes de vision permettant d'obtenir des informations visuelles 3D.

- **Chapitre 2** : Comme cette thèse est une première dans ce domaine au sein du département voire même dans la communauté française de la micromanipulation et du micro-assemblage, nous avons tenté de faire le lien entre l'assemblage de MEMS et les spécificités du micromonde. Ainsi, nous abordons les différentes approches existantes dans le domaine du micro-assemblage ; les contraintes liées à l'échelle à laquelle nous travaillons (présence des microforces) ; les moyens d'observation dans le micromonde et notre choix d'utiliser un microscope optique à la fois comme moyen d'observation et comme capteur au détriment des autres imageurs capables de fournir des résolutions suffisantes.

- **Chapitre 3** : Dans la plupart des applications liées à l'utilisation d'un capteur de vision, il est souvent nécessaire de connaître la géométrie de ce système afin de l'utiliser de manière plus performante. Dans notre cas, il ne s'agit plus d'une caméra conventionnelle équipée d'un objectif standard mais d'un microscope optique à fort grandissement. De plus, ce dernier est équipé d'un zoom et d'un système de mise au point motorisés et commandables via un ordinateur. Ainsi, sa modélisation diffère de celle connue pour les caméras utilisées dans le macromonde. La présence d'une optique différente engendre des contraintes majeures sur l'utilisation du microscope optique (faible profondeur de champ et un champ de vision réduit). Nous avons alors pensé à l'utilisation d'une mire de calibrage 2D (réelle et virtuelle) pour aboutir à un calibrage multi-échelle du système dont nous disposons, afin de maximiser ses performances, à la fois à bas, et à fort grandissement.

- **Chapitre 4** : La profondeur de champ qui caractérise le microscope optique, nous a conduit à développer des outils de vision à partir de techniques connues respectivement sous les noms de depth-from-focus et de pose-from-focus. À partir de l'approche depth-from-focus, nous avons développé une méthode afin estimer la profondeur de la scène pour pouvoir contrôler le micromanipulateur verticalement. Cette technique repose sur l'estimation du degré de netteté (focus) d'une série d'images prises en faisant un scan

(balayage) vertical de la scène. Ensuite, un algorithme de suivi ¹⁷ a été implémenté pour suivre le déplacement de la pince ¹⁸ par le microscope lors des tâches de micromanipulation ou de micro-assemblage. La seconde méthode utilise les pixels sélectionnés par la méthode précédente et jugés nets pour faire une reconstruction 3D de l'outil de préhension. La reconstruction 3D obtenue est entachée de fausses détections (pixels jugés nets même s'ils ne le sont pas). Ainsi, des méthodes de filtrage (sélection de pixels pertinents) ont été développées pour permettre un meilleur rendu de la reconstruction 3D proposée. Ces approches s'inspirent des méthodes d'analyse en composantes principales connues en statistiques ainsi que des méthodes basées sur le filtrage gaussien. Une fois les organes terminaux reconstruits, il est possible de calculer la pose 3D de ces derniers pour bien les aligner lors des tâches de préhension, ce qui garantit une meilleure prise du micro-objet sans torsion, ni flexion.

La seconde partie de ce manuscrit est dédiée à l'étude et au développement de lois de commande par asservissements visuels pour l'automatisation de plateformes de micromanipulation et de micro-assemblage.

- **Chapitre 5** : Ce chapitre offre une introduction sur les différentes approches existantes dans la littérature, ceci dans le souci de mieux positionner nos travaux. Cet état de l'art regroupe plus précisément les travaux de recherche ayant recours à la vision comme capteur pour réaliser des tâches de micromanipulation ou de micro-assemblage. Ensuite, ce chapitre présente nos apports sur la modélisation d'une loi de commande par asservissement visuel 2D multi-échelle, sur le développement d'une station de micromanipulation à 5 degrés de libertés et son contrôle, sur l'organisation d'un cycle de manipulation de micro-objets ; sur la planification et le suivi de trajectoire pour contourner les problèmes liés aux occultations ; sur la manipulation de fibres optiques avec une commande de type asservissement visuel 2D en utilisant cette fois-ci le détecteur de points d'intérêts SIFT. Ces travaux nous ont permis de cerner les limites d'une commande de type asservissement visuel 2D dans le cas d'un micro-assemblage de MEMS 3D, ce qui nous a conduit à orienter la suite des travaux vers une commande du type asservissement visuel 3D.

- **Chapitre 6** : Les travaux décrits dans ce dernier chapitre sont réalisés en collaboration avec Eric Marchand, chercheur au sein de l'équipe LAGADIC de l'IRISA de l'INRIA de Rennes. Cette collaboration réside dans l'utilisation du tracker VISP développé par cette équipe. Les problématiques traitées, dans ce chapitre, sont liées à l'utilisation des lois de commandes par asservissement visuel pour automatiser des tâches de micro-assemblage MEMS 3D plus complexes. Des critères comme la répétabilité, la robustesse, la précision, la complexité de l'assemblage, le nombre de microcomposants à assembler, le taux de réussite et le temps nécessaire pour réaliser un assemblage ont été pris en compte dans notre démarche. Ainsi, une loi de commande de type asservissement visuel 3D a été développée et validée sur un ensemble de micro-assemblages. Deux types d'assemblage ont été étudiés : l'assemblage de MEMS 3D comportant respectivement deux microcompo-

¹⁷tracking, de l'anglais

¹⁸gripper, de l'anglais

sants (sur deux niveaux) et à cinq microcomposants (sur trois niveaux). La répétabilité obtenue est largement suffisante pour valider les concepts ainsi que le temps de réalisation (40 secondes en moyenne pour réaliser un assemblage sur deux niveaux) qui reste encourageant. Il est de même pour la précision qui atteint $0.3\ \mu\text{m}$ en translation et 0.2° en rotation, ce qui offre une très bonne solidité du produit assemblé sans fixation externe (collage, soudure, etc.). En fonction de l'approche de tracking utilisée (single tracking ou dual tracking), deux lois de commandes sont implémentées. Dans la première, un seul micro-objet est suivi, ce qui nous donne une loi de commande séquentielle, c'est-à-dire que les trois degrés de liberté de la plateforme de positionnement sont contrôlés, suivis des deux degrés de liberté du micromanipulateur. Dans la seconde, les deux micro-objets à assembler sont trackés simultanément, ce qui offre un contrôle total de l'ensemble des cinq degrés de liberté de la station.

Ce manuscrit se termine par une conclusion générale sous forme d'un bilan sur l'ensemble des travaux effectués ainsi que sur les apports scientifiques de notre travail. Des perspectives sur des travaux futurs sont dressées pour explorer des aspects non traités durant la thèse ainsi que des orientations vers la nanomanipulation et le nano-assemblage par asservissement visuel.

PARTIE I

Introduction au micromonde, calibrage et reconstruction 3D par la méthode depth-from-focus

Chapitre 2

La manipulation et l'assemblage dans le micromonde

Nous présentons dans ce chapitre les contraintes majeures de la manipulation dans le micromonde. À partir de l'identification des problématiques phares liées à l'automatisation des tâches d'assemblage de microcomposants, nous abordons et nous mettons en avant la place de la vision par ordinateur, en général, et de la commande référencée vision dans le domaine de l'assemblage des MEMS, en particulier. Un accent est mis sur la compréhension de la physique qui régit le micromonde. Cette compréhension nous a aidé à mieux maîtriser les processus de micromanipulation et de micro-assemblage.

Sommaire

2.1	Marché mondial des microsystèmes	16
2.1.1	Domaines d'application des microsystèmes	17
2.1.2	Chronologie du microsystème	18
2.2	Micromanipulation et micro-assemblage	20
2.2.1	Micro-assemblage sériel	21
2.2.2	Micro-assemblage parallèle	22
2.3	Coût du micro-assemblage	23
2.4	Moyens d'observation du micromonde	24
2.4.1	Microscopie à champ lointain	25
	Microscopie photonique	26
	Microscopie électronique	28
2.4.2	Microscopie à champ proche	30
2.5	Microscope optique sur les stations de micro-assemblage et ses spécificités	33
2.5.1	Faible profondeur de champ	35
2.5.2	Faible champ de vision	36
2.5.3	Encombrement du microscope photonique	37
2.5.4	Faible distance de mise au point	38
2.5.5	Relation entre le contraste et l'illumination	39
2.6	Physique du micromonde	42
2.6.1	Forces surfaciques	43
2.6.2	Impact des microforces en micro-assemblage	46
2.7	Conclusion	47

2.1 Marché mondial des microsystèmes

Depuis quelques dizaines d'années, la miniaturisation des produits intéresse de plus en plus l'industrie. Le besoin croissant d'avoir plus de fonctions dans des systèmes à volume réduit est l'une des raisons de cette volonté d'aller vers l'infiniment petit. Plus le système est petit, plus il est facilement intégrable dans un produit fini. À l'inverse des produits micro-électroniques, la réalisation de ces derniers fait appel à l'utilisation de plusieurs techniques et technologies complètement différentes. Ces technologies relèvent de la mécanique, la thermique, l'électronique, l'optique, etc. On parle de ces produits ou de ces systèmes dans la littérature sous les acronymes MEMS, NEMS, MOEMS, Bio-MEMS,...etc. Nous utiliserons dans la suite le mot **microsystème** pour regrouper tous les acronymes cités auparavant.

Définition.3.1.1 : un microsystème électromécanique est un système comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques, utilisant l'électricité comme source d'énergie, en vue

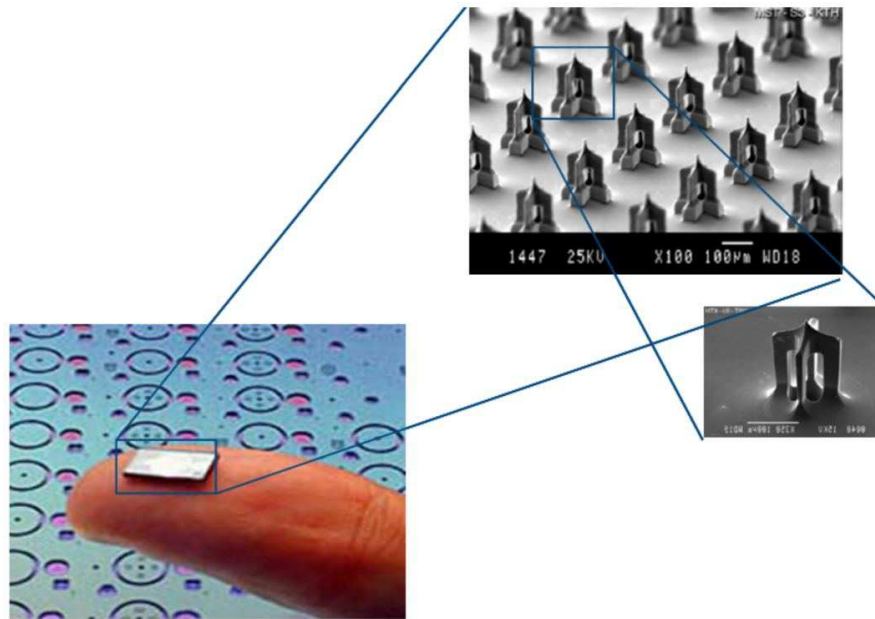


FIG. 2.1 – Exemple d'un MEMS pour le domaine du biomédical : la matrice injectrice d'insuline chez les diabétiques.

de réaliser une fonction de capteur et/ou d'actionneur avec au moins une structure présentant des dimensions micrométriques ; la fonction du système étant en partie assurée par la forme de cette structure. Le terme utilisé en Europe pour désigner de tels systèmes est MST (MicroSystems Technology),¹ mais il est moins répandu que le terme MEMS.

2.1.1 Domaines d'application des microsystèmes

La mécatronique, en général, et la micromécatronique, en particulier, connaissent actuellement un développement réel. Aujourd'hui, un grand nombre de secteurs bénéficie ou va bénéficier des technologies du silicium. Parmi les consommateurs de microsystèmes qui vont des domaines pointus comme la recherche aux utilisateurs quotidiens, nous pouvons citer entre autres :

- **Le domaine de l'automobile** : alors qu'une des premières applications des MEMS ne consistait qu'en un simple capteur de pression des pneus (appelés pneus intelligents par les automobilistes), les microsystèmes font désormais partie intégrante des systèmes automobiles où ils remplissent de plus en plus de fonctions complexes. Ces systèmes recouvrent, par exemple, les accéléromètres pour airbag, les capteurs de niveau de carburant, le contrôle de puissance de freinage et la réduction du bruit dans les habitacles. Les applications les plus récentes dans le domaine

¹Technologie des microsystèmes

de l'automobile sont l'aide au diagnostic ou pronostic sur l'usure de certaines parties du moteur ou autre partie du véhicule.

- **Le domaine de l'aéronautique** : ce domaine nécessite des MEMS capables de fonctionner dans des environnements difficiles. En effet, la plupart des microcapteurs utilisés fonctionnent dans des conditions extrêmes de pression et de température très élevées ou à l'inverse très basses. Un exemple d'application des MEMS dans l'aéronautique concerne l'utilisation de capteurs aérodynamiques internes et externes sur les avions.
- **Le domaine de la médecine** : la principale application des microsystèmes dans le biomédical est la réalisation de systèmes d'injection de produits dans le corps humain. Un des tous premiers microsystèmes fut la *matrice* d'injection d'insuline chez le patient (FIG. 2.1). Elle vient remplacer la traditionnelle seringue d'insuline utilisée par le patient lui même au moment où il se sent affaibli. Contrairement à l'utilisation de la seringue, la matrice comporte plusieurs micro-aiguilles de faible profondeur de pénétration, de l'ordre de $100\ \mu\text{m}$ et se porte sous forme d'un patch collé sur la peau. Elle fonctionne en continu et permet de délivrer de l'insuline en cas de besoin pour le patient, tout au long de la journée. Les quantités sont calculées à chaque cycle (compression/dépression) pour que la micropompe délivre environ 150 nL ce qui permet de doser ainsi très précisément la quantité d'insuline à injecter chez le patient.
- **Le domaine de l'optique** : les microsystèmes optiques (MOEMS) se divisent en deux grandes catégories. La première concerne les composants fonctionnant selon les principes de l'optique géométrique pour la commutation spatiale de la lumière (shutter optique, ...). La deuxième fait référence à des composants basés sur l'optique physique (microcavité optique de type Fabry-Pérot, micromiroirs pour optique adaptative...) [DCM04]. Les grands domaines d'application concernent les communications optiques (interconnexions optiques dans les systèmes WDM ²), la micro-optique adaptative et les microcapteurs (microcapteur de déplacement, de gaz, microspectromètre [DZP⁺07] [DSPS08] (FIG. 2.2)...).
- **Le domaine du quotidien** : les MEMS sont très présents dans notre vie quotidienne notamment dans les baladeurs MP3, les téléphones portables, sur les têtes d'imprimantes à jet d'encre et bien d'autres objets dont nous ne soupçonnons même pas l'existence.

2.1.2 Chronologie du microsystème

Une des premières applications des MEMS fut un transistor à effet de champ à grille résonant conçu par *Westinghouse* dans les années 1960. Même si ce produit s'est avéré être principalement un objet de curiosité, il a marqué la naissance d'une technologie devenue omniprésente. Au début des années 1970, les fabricants utilisaient des plaquettes de substrat gravées pour produire des capteurs de pression. Des expériences furent ensuite

²Wavelength Data Multiplexing

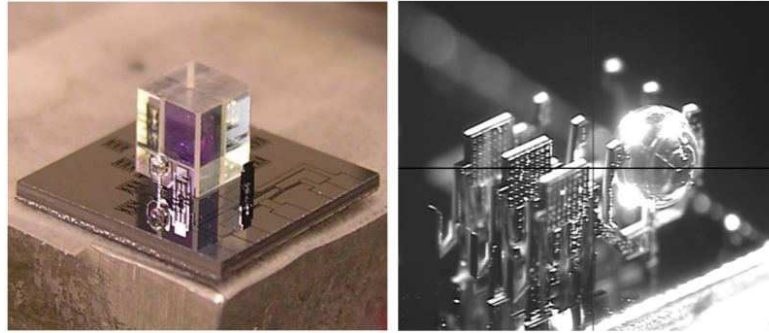


FIG. 2.2 – Exemple d'un spectromètre réalisé par le laboratoire ARRI de l'Université Arlington du Texas aux USA.

menées au début des années 1980 avec la technique du micro-usinage pour créer des actionneurs en silicium polycristallin utilisés dans les têtes de lecture de disques durs. A la fin des années 1980, le potentiel des MEMS devint largement reconnu et leurs applications commencèrent à pénétrer dans le monde de la microélectronique et du biomédical.

À la fin des années 1990, les dispositifs MEMS commençaient à faire leur apparition dans l'industrie avec une fabrication à grande échelle. À partir de 2004/2005, la communauté scientifique commence à porter un grand intérêt pour la nanorobotique et les NEMS (nanosystèmes), voir figure FIG. 2.3. En raison de leur taille encore plus petite que celle des MEMS, il faut encore davantage d'efforts pour comprendre leur physique. Cette physique proche de l'atome s'avère plus compliquée que celle des MEMS. À ces échelles, non seulement les forces surfaciques, prépondérantes dans le micromonde, le sont de même dans le *nanomonde* mais également **les phénomènes quantiques** y sont très présents. Peu de travaux de recherche (qui restent des travaux d'approches)

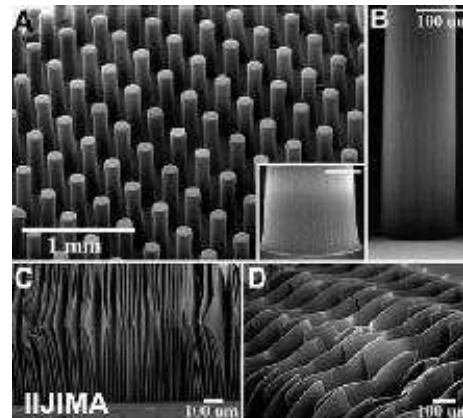


FIG. 2.3 – Un exemple de NEMS.

existent dans le domaine de la nanomanipulation et sont essentiellement liés à la manipulation de nanotubes de carbone [SGA98] [HCR+06] [DSF+08]. Les études de marché prévoient une grande expansion des NEMS à l'horizon 2010. Le silicium peu coûteux et présent en grande quantité sous la croûte terrestre ne suffira plus, donc il faudra aller vers d'autres matériaux plus performants, plus complexes et plus prometteurs comme l'or, le carbone, le PZT (Titano-Zirconate de Plomb)³, les polymères, etc. Bien d'autres éléments, cette fois-ci biologiques, intéressent les scientifiques pour leurs propriétés d'auto-

³formule chimique : $Zr_xTi_{1-x}O_3$

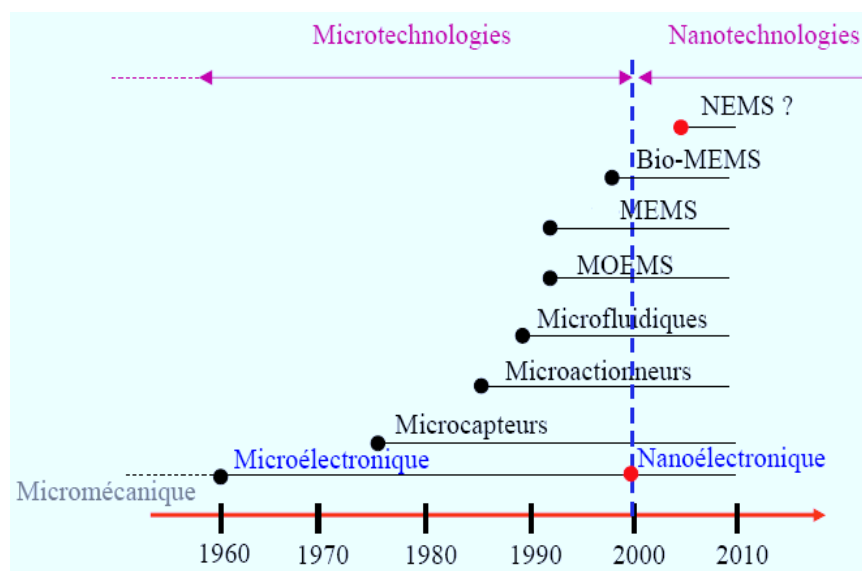


FIG. 2.4 – La chronologie de l'apparition et de l'évolution des microsystèmes depuis les années 1960.

assemblage comme les protéines et les acides nucléiques (ADN, ARN).

Le troisième rapport de l'analyse du marché des MEMS par le programme **NEXUS** fournit une estimation de l'évolution du marché des microsystèmes. Cette analyse couvre le quadriennal 2005-2009 et elle s'appuie sur les rapports publiés en 1998 et 2002 pour estimer l'explosion des besoins en microsystèmes. Bien qu'une estimation précise reste difficile, des chiffres qui se rapprochent ont été avancés par les experts du programme NEXUS. Le chiffre de 12 milliards de dollars a été estimé pour l'année 2004 avec une progression d'environ 16 % par an pour atteindre les 25 milliards de dollars en 2009. Et c'est sans grande surprise le domaine des télécommunications qui arrive en tête du classement des consommateurs de MEMS, tout juste devant le domaine de l'automobile.

2.2 Micromanipulation et micro-assemblage

Qu'il s'agisse de MEMS ou de composants assemblés, une grande diversité de systèmes nécessite pour leur réalisation des phases de micro-assemblage. Il existe une dualité entre la manipulation et l'assemblage. Une partie de la communauté scientifique considère l'assemblage comme étant intégré dans la manipulation tandis que l'autre partie défend l'hypothèse que l'assemblage est composé de sous-tâches dont la manipulation fait partie.

Définition.3.2.2 : l'assemblage recourt à des composants élémentaires individuels ou discrets. Ces éléments sont assemblés ensemble par emboîtement (insertion), à l'aide de

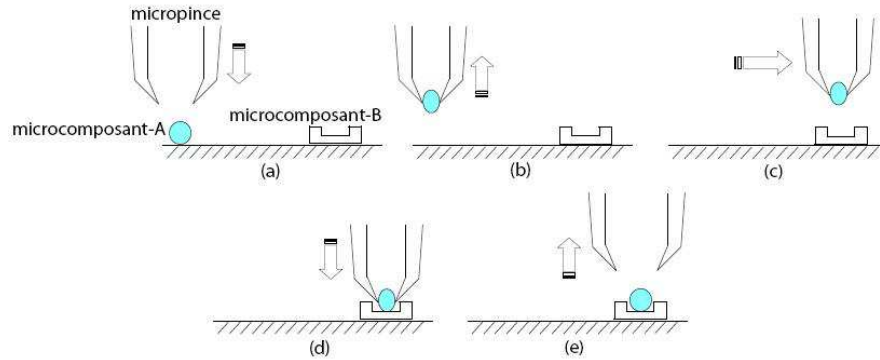


FIG. 2.5 – Micro-assemblage en série, [RAK06].

techniques de collage (colle UV, colle thermique, cire), par soudure (wire bonding ⁴), par collage moléculaire (technique basée uniquement sur la réaction moléculaire entre deux matériaux différents et cela sans intervention d'un élément de collage). D'après Cohn et al. [CBN+98], il existe deux types d'assemblage microrobotique : le micro-assemblage sériel et le micro-assemblage parallèle.

2.2.1 Micro-assemblage sériel

Dans l'assemblage en série, les micro-objets sont assemblés en respectant le traditionnel cycle "pick & place" ⁵ [HP00] [ECM03] [TDFL08]. C'est une approche dite séquentielle avec des sous-tâches comme : détecter la pièce **A**, orienter la pièce **A**, positionner la pièce **A**, saisir la pièce **A**, transférer la pièce **A**, déposer la pièce **A** ... détecter la pièce **B**, orienter la pièce **B**, positionner la pièce **B**, saisir la pièce **B**, transférer la pièce **B**, déposer la pièce **B**...etc (FIG. 2.5). Les approches basées assemblage sériel requièrent l'utilisation de stations de micro-assemblage équipées de microrobots (axe de translation et d'orientation), de systèmes de vision, de systèmes de préhension, ...etc.

L'assemblage s'effectue en mode :

- télé-opéré en utilisant un joystick,
- automatique par boucle ouverte avec une phase de calibrage de la structure mécanique du microrobot pour atteindre les performances requises en précision,
- automatique par boucle fermée avec un retour d'effort (force feedback),
- automatique par boucle fermée par une commande référencée vision,
- automatique par commande hybride force/vision.

⁴soudage par fil

⁵prise-et-dépose

2.2.2 Micro-assemblage parallèle

En micro-assemblage parallèle, plusieurs microcomposants (objets identiques ou différents) sont assemblés simultanément. Le concept d'assemblage parallèle intéresse particulièrement les industriels pour ses avantages économiques. Une cadence d'assemblage de 10^6 microsystèmes par seconde peut être atteinte avec ce type d'approche. Il existe deux concepts dans l'assemblage parallèle :

Assemblage déterministe : l'idée est de placer l'ensemble des microcomposants \mathbf{A}_i sur un premier wafer ⁶ et les microcomposants \mathbf{B}_i sur un second wafer. Ensuite, il suffit de placer le premier wafer sur le deuxième wafer pour obtenir une série de structures assemblées $[\mathbf{AB}]_i$ (FIG. 2.6). Il existe également des systèmes de préhension capables de saisir plusieurs micro-objets en même temps et de les assembler les uns dans les autres (FIG. 2.7).

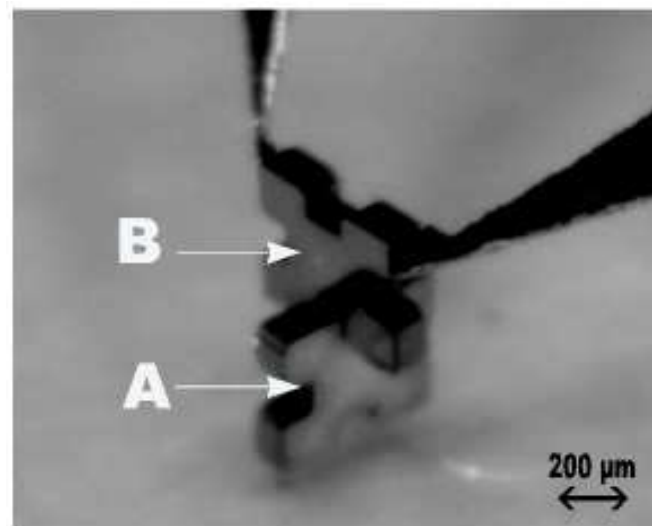


FIG. 2.6 – Micro-assemblage déterministe.

Assemblage stochastique : contrairement à l'assemblage déterministe, les composants sont disposés en *vrac*, (FIG. 2.8). L'assemblage s'effectue alors par des processus stochastiques de type [DLS03] [WKL04] :

- vibration et agitation des composants pour construire des couples d'objets,
- programmation des champs de forces,
- utilisation des forces électrostatiques,
- processus et interactions chimiques.

⁶substrat

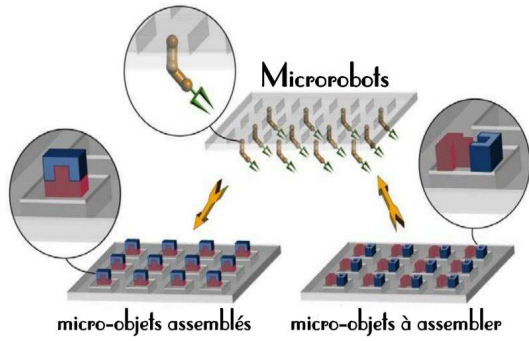


FIG. 2.7 – Illustration d'un assemblage robotique parallèle (approche déterministe), [PS02].

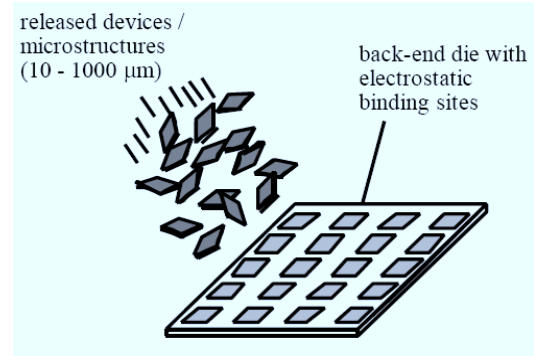


FIG. 2.8 – Illustration d'un assemblage robotique parallèle (approche stochastique), [CBN⁺98].

2.3 Coût du micro-assemblage

Comme il a été dit, au début de ce chapitre, afin que l'assemblage de microsystemes soit rentable et intéressant pour les industriels, il faut réduire le coût d'assemblage. Il faut savoir que 80% du prix total d'un MEMS correspond à son prix d'assemblage. Ceci est lié en partie au prix de revient des stations d'assemblage (axes de positionnement, microscopes, système de préhension, environnement contrôlé,...) et en partie à la main d'œuvre. Cependant, plus l'opérateur humain passe de temps sur l'assemblage d'un microsysteme, plus le prix de ce dernier augmente. Autrement dit, réduire le coût d'un microsysteme revient à réduire le coût de l'assemblage. Chollet et *al.* [KCBWJ03] du Laboratoire de Production Microtechnique de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse, se sont penchés sur l'étude du problème du coût de l'assemblage. Il en est ressorti que le coût de l'assemblage peut être séparé en deux parties : l'alimentation de la micro-usine en composants et l'assemblage de ces derniers. Le coût total de l'assemblage de N composants est donné par la relation suivante :

$$C_{total} = \sum_N \frac{1}{Y_i} (C_f + C_a) \quad (2.1)$$

où Y_i est le taux de conformité du composant i , C_f le coût pour l'alimentation ⁷ en composants et C_a le coût nécessaire pour l'assemblage de tous les composants.

Le travail décrit dans ce manuscrit traite du problème de l'assemblage sériel où l'alimentation en micro-objets est assurée manuellement par un opérateur humain. Les composants sont posés aléatoirement sur la plateforme de positionnement. Notre intérêt est donc de réduire le coût de l'assemblage par la réduction du temps de cycle de l'assemblage. Le processus d'assemblage est également réalisé en deux étapes : d'abord le positionnement des éléments **A** et **B** respectivement à leur bonne position, ensuite l'insertion de l'élément **B** dans l'élément **A**. Le temps de cycle total est la somme du temps nécessaire

⁷feeding, de l'anglais

pour le positionnement ($T_{pos(A,B)}$) et du temps nécessaire pour l'insertion (T_{ins}) donné par la relation suivante :

$$T_{total} = T_{pos(A,B)} + T_{ins} \quad (2.2)$$

Le temps T_{total} est inversement proportionnel à la taille des objets à assembler. Plus les objets à assembler sont petits, plus les exigences en terme de précision sont élevées et plus la précision requise est élevée, plus le temps de positionnement est important. La complexité des sous-tâches d'assemblage à réaliser avant d'aboutir à un microsystème joue également un rôle important (FIG. 2.9). Ainsi, assembler par empilement de couches 2D n'a pas le même coût qu'un assemblage 3D complexe par emboîtement.

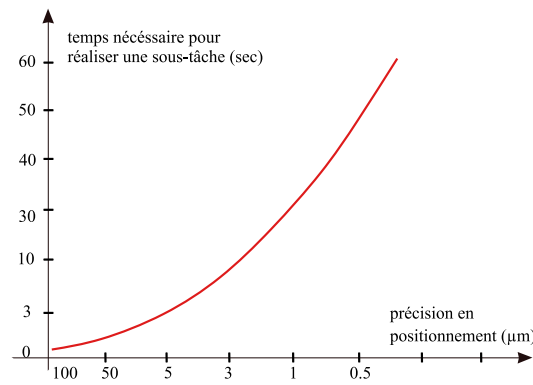


FIG. 2.9 – Représentation du temps nécessaire pour le positionnement en fonction de la précision requise.

Dans la section suivante de ce chapitre, nous nous sommes posés la question sur les moyens d'observation nécessaires pour la réalisation de tâches dans le micromonde. Ceux-ci auront deux rôles, d'abord permettre l'observation (surveillance) du bon déroulement des tâches de micromanipulation ou de micro-assemblage (en mode télé-opéré) et ensuite permettre l'automatisation de ces tâches en utilisant cet observateur comme capteur dans le cadre d'une commande référencée vision. Nous verrons qu'à ces échelles là, le panel de capteurs est très réduit.

2.4 Moyens d'observation du micromonde

La curiosité qui réside en nous, cette soif de *comprendre* le monde, comprendre toutes les choses qui nous entourent, a amené l'Homme à des découvertes stupéfiantes. L'Homme et son infatigable manie d'essayer et de tester l'ont conduit à inventer la roue, à voler, à aller sur la lune, découvrir le fin fond de la terre et de la mer, etc. Pour ce faire, l'Homme utilise ces 5 sens. L'information acquise est envoyée vers le cerveau pour l'interpréter, une fois interprétée, une décision sera prise et véhiculée vers les muscles. C'est ainsi que l'homme agit avec son environnement. Parmi les cinq sens dont nous disposons, il y a

l'œil. Dans le monde animal, il existe une quarantaine de types d'organe de vision (les yeux). Ces derniers peuvent aller du plus simple capable de détecter une simple différence entre la lumière et l'obscurité jusqu'au plus complexe, comme l'œil humain capable de distinguer les formes et les couleurs. La vision humaine est donc très puissante et très complexe. Nous possédons une capacité de *champ de vision* impressionnante, ainsi nous pouvons, au choix, visualiser tout un panorama d'un seul *coup d'œil* ou fixer un avion dans le ciel qui représente moins d'une seconde d'arc. Il est de même pour ce qui concerne le *focus* c'est-à-dire, nous percevons une zone de netteté très importante à la fois lorsque nous fixons un objet macrométrique ou lorsque nous observons un objet micrométrique (quelques centaines de micromètres). Enfin, en ce qui concerne le pouvoir de résolution de l'organe de vision humaine, sa capacité est impressionnante, c'est-à-dire que l'être humain est capable de distinguer des objets d'une taille d'une cinquantaine de micromètres. Bien entendu, impossible d'aller voir ce qui se passe durant les tâches de micromanipulation ou de micro-assemblage. Même si nous manipulons des micro-objets d'une centaine de micromètres, la précision requise est souvent estimée à quelques micromètres.

L'un des grands défis de la technologie a été de fabriquer des *yeux électroniques* capable d'élargir voire même de dépasser les aptitudes des yeux du monde vivant pour, par exemple, aller vers l'infiniment petit et voir des détails inférieurs au micromètre ou vers l'infiniment grand et observer les étoiles.

L'ensemble des techniques et matériels définis pour produire une image visible d'un objet ou d'un détail trop petit pour l'œil humain, par des rayons d'agrandissement s'appelle la microscopie (du grec *mikros* : petit et *skopein* : examiner). À travers la figure [FIG. 2.11](#), nous pouvons faire un classement grossier des outils de vision en fonction de la précision requise (donc de la résolution de l'imageur) lors des tâches de manipulation.

Au fur et à mesure des avancées technologiques, la microscopie s'est progressivement imposée comme une technique d'observation indispensable pour accéder aux propriétés de la matière inanimée ou vivante. Deux techniques de microscopie peuvent être considérées :

- **La microscopie à champ lointain** : qui utilise le rayonnement réfléchi, réfracté ou diffracté par l'objet considéré. Ce type de système de vision est limité par la longueur d'onde du rayonnement employé.
- **La microscopie à champ proche** : dans laquelle une sonde est déplacée à la surface de l'objet étudié et est maintenue en contact ou à très faible distance de celui-ci au moyen d'une boucle de rétroaction. Cependant, elle est limitée par la dimension du dispositif d'observation (taille de la pointe pour un microscope à effet tunnel ou à force atomique, largeur du trou d'observation pour un microscope optique à champ proche).

2.4.1 Microscopie à champ lointain

La classification des microscopes à champ lointain repose sur le mode de rayonnement utilisé. Nous pouvons faire référence à quelques systèmes de microscopie cités ci-dessous :

Microscopie photonique



FIG. 2.10 – Le microscope de Hooke.

Le microscope photonique, généralement connu sous le nom de microscope optique, dit également «à plein champ» est sans doute l'ancêtre des microscopes. C'est en 1590, alors âgé de 10 ans, que *Zacharias Janssen*, de nationalité hollandaise, a inventé le tout premier microscope optique.

Plus tard, en 1664, *Robert Hooke* publie son livre *Micrographia* qui résume un ensemble d'observations réalisées à partir du microscope photonique moderne (FIG. 2.10). Cette première version est constituée d'un oculaire, d'une lentille de champ et d'un objectif. À *Hooke*, on doit les premières descriptions d'une cellule biologique à travers son observation au microscope optique.

Sur la figure FIG. 2.12, est donné un exemple d'observation d'une cellule biologique ($40\ \mu\text{m}$) avec un microscope optique équipé d'un grossissement de $400\times$.

À la microscopie optique est venu s'adjoindre plusieurs autres techniques telles que :

a - La microscopie à fluorescence : ce type de microscope photonique est équipé de deux lampes, une lampe ordinaire pour une observation classique et une deuxième lampe à arc de fluorescence. Des filtres d'excitation permettent de choisir la longueur d'onde incidente et des filtres d'émission (ou d'arrêt) donnant la possibilité de sélectionner les radiations émises par l'objet excité. Il est à noter qu'un bon contraste est obtenu avec ce type de microscope optique, malgré une perte de résolution due à l'émission de fluorescence défocalisée qui se superpose à l'image du plan focal. Ce problème a été résolu par la microscopie confocale. La différence peut être constatée en comparant les images représentées sur les figures FIG. 2.13 et FIG. 2.14.

b - La microscopie confocale : ce système possède la propriété de réaliser des images de très faible Profondeur de Champ (*PdC*) d'environ 400 nm appelées «sections optiques» ou encore «coupes optiques virtuelles». La première version de ce type d'appareil a été inventée par *Marvin Minsky* en 1957 au «Massachusetts Institute of Technology» (MIT) aux États-Unis d'Amérique. Dans le dispositif mis en place par *Minsky*, la lentille condenseur du microscope conventionnel est remplacée par une lentille équivalente à la celle de l'objectif (même ouverture numérique). Un diaphragme est placé devant la source lumineuse et permet de former une source ponctuelle qui est projetée sur l'échantillon et observé par la lentille condenseur. Ainsi, les plans de la source lumineuse et celui de

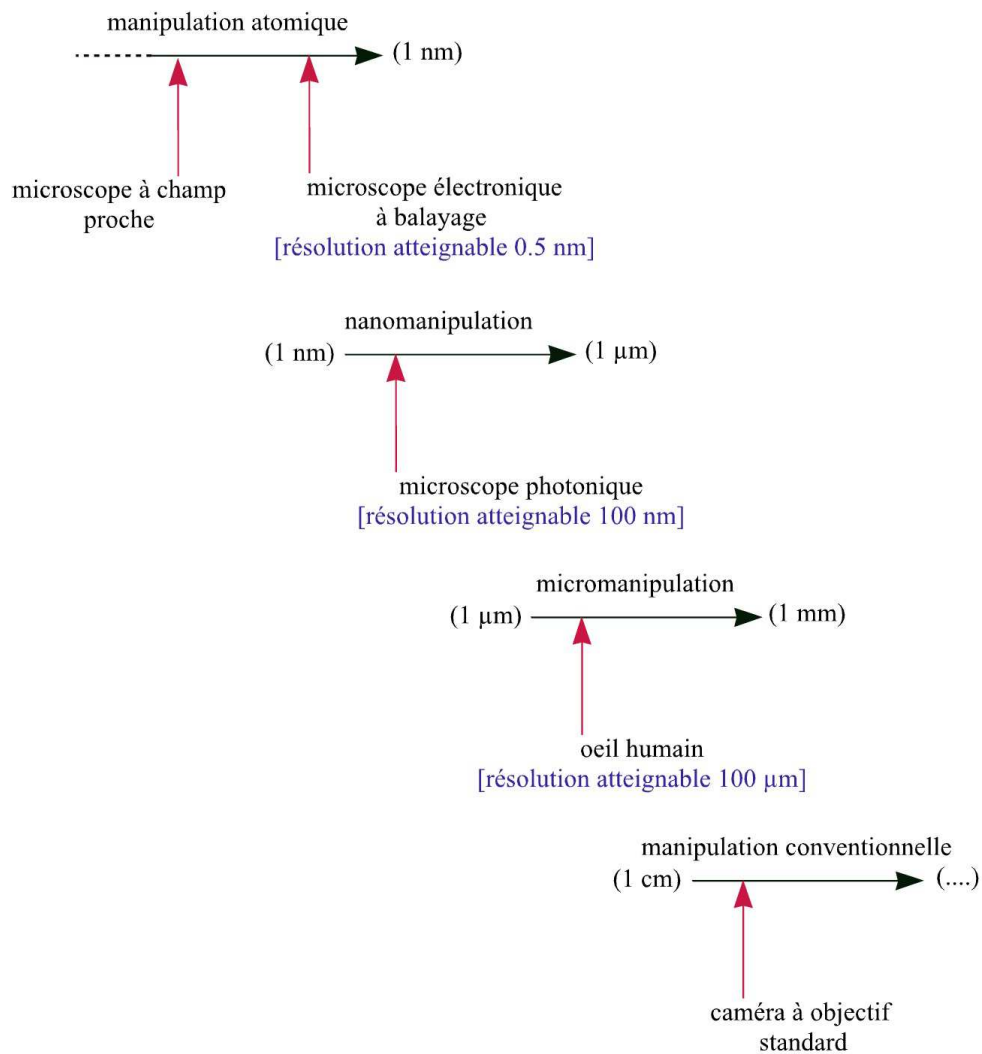


FIG. 2.11 – Illustration sur le choix du système de vision en fonction de la résolution requise.

l'image produit par le deuxième objectif sont conjugués. Le fait de placer un diaphragme dans ce plan, engendre la réduction de la lumière transmise derrière le plan image aux seuls photons provenant du plan de focalisation. Un exemple d'une image acquise par un tel dispositif est porté sur la figure [FIG. 2.13](#). Il reste néanmoins deux inconvénients majeurs liés à l'utilisation du microscope confocal qui sont : le problème de la luminosité et celui de la lenteur de l'acquisition des images.

c - Microscopie à contraste de phase : c'est un dispositif qui exploite les changements de phase d'une onde lumineuse traversant un échantillon. Cet instrument fut développé par le physicien hollandais *Frederik Zernike* dans les années 1930 qui a été récompensé, par la suite, par un prix Nobel de physique pour ces travaux en 1953. Le fonctionnement du microscope à contraste de phase repose sur le principe de l'holographie [\[Kim00\]](#). L'image obtenue est sous forme d'une topographie 3D de la surface de l'échantillon observé ([FIG. 2.15](#)).

Microscopie électronique

La grande révolution en terme de systèmes de vision à fort grandissement et forte résolution vient avec l'invention des microscopes électroniques comme le microscope électronique à transmission (MET) ⁸, le Microscope Électronique à Balayage (MEB) ⁹ ou encore le Microscope Électronique à Balayage par Transmission (MEBT). À l'origine de cette découverte, en 1931, nous retrouvons *Max Knoll* et *Ernst Ruska*, d'origine allemande, récompensés plus tard par le prix Nobel de physique en 1986 pour leurs formidables apports à l'imagerie numérique à haute résolution avec l'invention du MET. Pour la première fois, le rayonnement de l'échantillon observé par des photons est remplacé par un rayonnement d'électrons. Ainsi, la résolution des imageurs est portée jusqu'à la limite de la longueur d'onde de De Broglie des électrons. Pour un ordre d'idée, la réso-

⁸TEM, Transmission Electronic Microscopy, de l'anglais

⁹SEM, Scanning Electronic Microscopy, de l'anglais

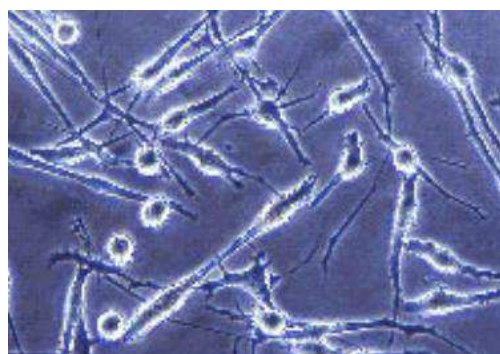


FIG. 2.12 – Un exemple d'une image prise par un microscope photonique (grossissement de 400×) d'une cellule biologique.

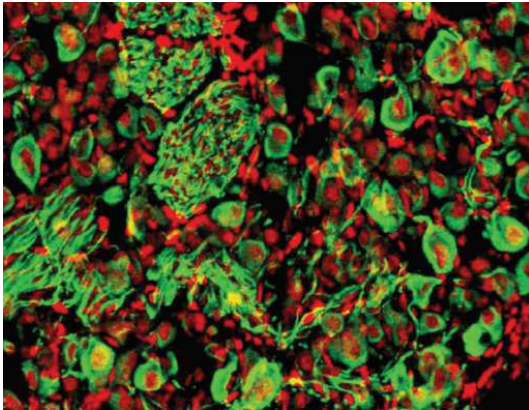


FIG. 2.13 – Un exemple d'une image prise par un microscope confocal de type Biorad MRC 1024.

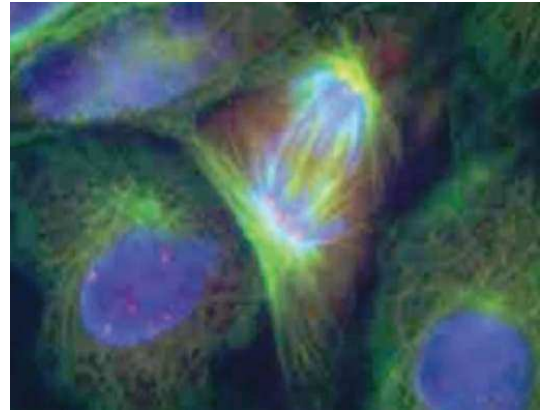


FIG. 2.14 – Un exemple d'une image d'un anticorps prise par un microscope à fluorescence.

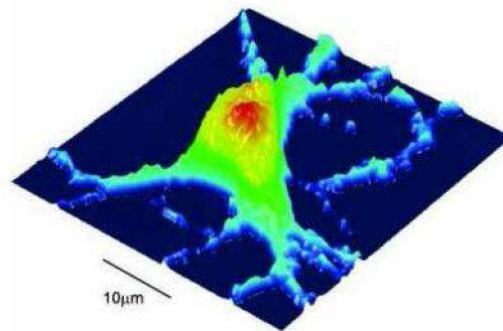


FIG. 2.15 – Une cellule neuronale vue par un microscope à contraste de phase, [Kim00].

lution peut atteindre le centième d'Angström.

a - Microscope électronique à transmission : l'imagerie par microscopie électronique à transmission (par transparence) est basée sur l'envoi d'un faisceau d'électrons qui sera transmis à travers un échantillon très mince. Les effets d'interaction entre les électrons et l'échantillon donnent naissance à une image, dont la résolution peut atteindre 0,8 Angströms. Les images obtenues ne sont généralement pas explicites et doivent être interprétées à l'aide d'un support théorique. La figure FIG. 2.16 donne un exemple d'une image obtenue avec un MET. L'épaisseur très fine des échantillons limite l'utilisation du microscope électronique à transmission aux structures biologiques et à l'analyse d'échantillons très minces (pour en savoir davantage sur le MET, se référer à [WC96]).

b - Microscope électronique à balayage : le microscope électronique à balayage a été imaginé pour la première fois en Allemagne, dans les années 1930, par *Knoll* et

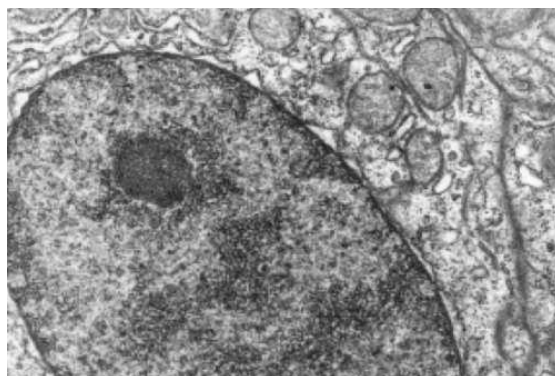


FIG. 2.16 – Exemple d’une image MET d’une cellule avec une résolution de 3.4 nm.

Von Ardenne et développé par Zworykin, Hillier et Snyder dans les laboratoires RCA aux États-Unis en 1940. Mais le MEB a connu son véritable essor qu’entre 1948 et 1965, grâce aux progrès techniques de la télévision et des détecteurs d’électrons et grâce aux recherches d’Oatley et de ses condisciples à Cambridge. Cette nouvelle technologie a permis, du fait de sa profondeur de champ, l’observation du relief d’échantillons massifs. Le principe du balayage consiste à explorer la surface de l’échantillon par lignes successives et à transmettre le signal du détecteur à écran cathodique dont le balayage est exactement synchronisé avec celui du faisceau incident. Le principe de fonctionnement est basé sur des interactions électrons-matière capable de produire des images à haute résolution de la surface du sujet étudié. Pour se faire, un faisceau d’électrons est accéléré et envoyé sur l’échantillon en mode balayage. L’impact des électrons sur la surface de la matière engendre principalement trois groupes d’électrons (électrons incidents, rétro-diffusés et secondaires). Les électrons secondaires sont de basse énergie et sont accélérés vers un détecteur d’électrons secondaires, qui amplifie le signal. À chaque point d’impact correspond un signal électrique. L’intensité de ce signal électrique dépend à la fois de la nature de l’échantillon au point d’impact qui détermine le rendement en électrons secondaires et de la topographie de l’échantillon au point considéré. Il est ainsi possible, en balayant le faisceau sur l’échantillon, d’obtenir une cartographie de la zone balayée. Les images obtenues sont de grande qualité en présentant un relief 3D de la scène observée (FIG. 2.17).

2.4.2 Microscopie à champ proche

Appelée généralement microscopie à sonde locale, la grande originalité de la microscopie en champ proche est de s’affranchir du régime de propagation, et donc des limites de résolution qu’il impose, en plaçant la sonde à proximité immédiate de l’échantillon. Dans ces conditions, la résolution latérale de l’image dépend principalement de la forme de la sonde et de la distance pointe-échantillon. Les premiers microscopes à sonde locale furent d’abord le microscope à effet tunnel (1982) souvent désigné sous le sigle STM ¹⁰

¹⁰Scanning Tunneling Electron Microscope, de l’anglais

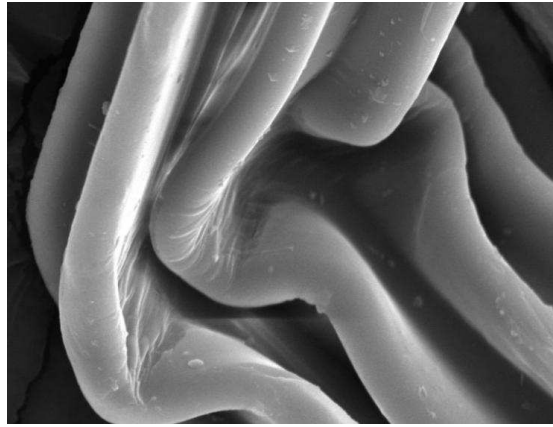


FIG. 2.17 – Exemple d'une image provenant d'un MEB d'une fibre de polyester avec un grossissement de $1\,500\times$.

bientôt suivi par le microscope à force atomique ou AFM ¹¹ en 1985. Leurs inventeurs, *G. Binnig* et *H. Rohrer*, obtinrent le prix Nobel de physique en 1986.

a - Microscope à force atomique : l'AFM est une technique de microscopie à sonde locale qui permet d'observer le relief d'une surface (voir figure FIG. 2.20). Pour ceci une pointe très fine supportée par un microlevier balaie l'échantillon. La pointe très proche de la surface subit de la part de celle-ci des forces attractives ou répulsives selon la distance pointe-surface mesurée par la déviation du levier. En stabilisant au cours du balayage la position de la pointe pour obtenir une déviation constante, on obtient ainsi une image iso-force de la surface qui reflète sa topographie (FIG. 2.18). L'observation d'une surface par AFM permet de visualiser sa topographie pratiquement à l'échelle atomique. Son utilisation est universelle puisque que l'on peut à la fois étudier des échantillons conducteurs et non conducteurs.

b - Microscopie à effet tunnel : cette technique est basée sur un phénomène physique connu depuis les origines de la mécanique quantique, l'effet tunnel. Un microscope à effet tunnel est constitué de deux électrodes de conductivité raisonnable dont l'une a la forme d'une pointe et l'autre est la surface du film à étudier. La distance pointe-échantillon est de l'ordre de quelques angströms ($1\text{ Å} = 10^{-10}\text{ m}$). Si une tension de polarisation est appliquée entre la pointe et la surface, les électrons ont une probabilité non nulle de passer d'une électrode à l'autre et un courant tunnel va donc naître. Le principe de l'expérience consiste à déplacer la pointe au-dessus de la surface du film (à l'aide de céramiques piézo-électriques) en maintenant le courant tunnel constant par un dispositif d'asservissement. Ainsi, la distance pointe-échantillon reste constante et l'enregistrement des déplacements verticaux de la pointe reproduit alors fidèlement la topographie de la surface. Si la pointe est suffisamment fine (micro-pointe de quelques

¹¹ Atomic Force Microscope, de l'anglais

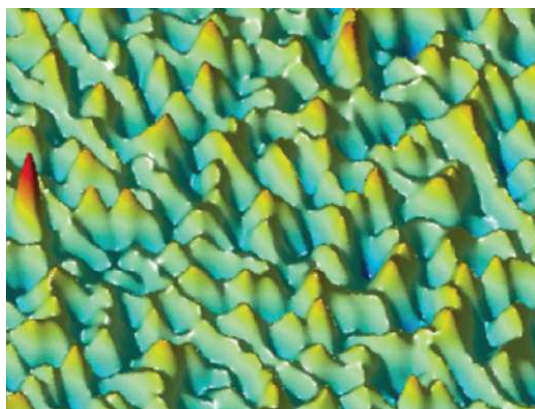


FIG. 2.18 – Topographie d'une surface de silicium obtenue par AFM, image réalisée sur la station «AMIS» du laboratoire AS2M de l'institut Femto-St, [Par08].

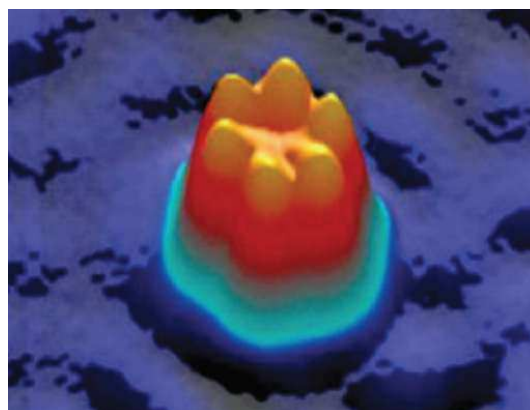


FIG. 2.19 – Image par microscopie à effet tunnel de la molécule à six "pattes" sur une surface de cuivre, Université Libre de Berlin.

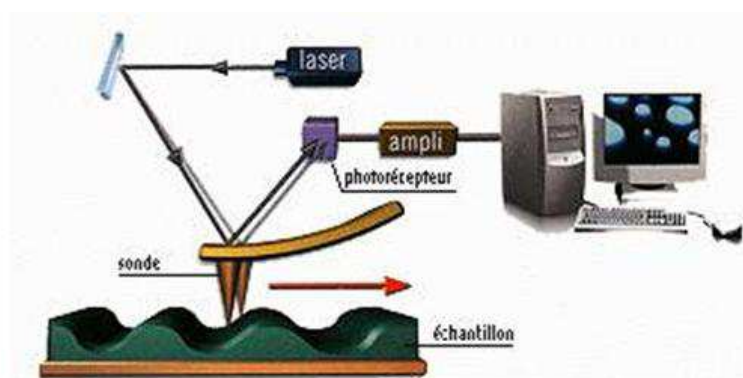


FIG. 2.20 – Schéma du fonctionnement d'un microscope à force atomique.

angströms), le relief observé peut avoir la résolution atomique (FIG. 2.19). Néanmoins, l'utilisation du TEM est restreinte à des échantillons conducteurs d'électricité.

c - Microscopie optique à champ proche : il est vrai que la microscopie photonique a permis à l'Homme d'aller voir, pour la première fois, des détails micrométriques. Cependant, le fait que le microscope optique soit basé sur l'utilisation du rayonnement lumineux de l'objet qu'on cherche à visualiser, sa résolution se trouve limitée par la longueur d'onde de la lumière utilisée. La résolution maximale, qui peut être atteinte, est de $0.2 \mu\text{m}$ en adéquation avec le critère de Rayleigh de la plus petite longueur du spectre du visible. Une des manières de résoudre ou dépasser cette limitation consiste à placer le détecteur de lumière très proche de la surface. Ceci permet d'observer non pas l'onde dispersée mais plutôt l'onde évanescente. Grâce à cela, il est possible de visualiser des

détails plus petits que la longueur d'onde de la lumière. Ce nouveau principe porte le nom de la microscopie optique à champ proche (SNOM)¹². Le premier principe de la microscopie à champ proche fut proposé par *Syngé* en 1928, principe appliqué beaucoup plus tard et pour la première fois par *D. W. Pohl* en 1984.

À travers le graphique représenté sur la figure [FIG. 2.11](#) et en fonction des tâches de micromanipulation et de micro-assemblage à réaliser, le choix du système de vision est rapidement fait. Les micro-objets utilisés pour valider les concepts avancés plus tard, sont de l'ordre d'une dizaine de micromètres à quelques centaines de micromètres. La précision requise avoisine le micromètre. Avec son pouvoir de résolution de $0.2\ \mu\text{m}$, le microscope optique s'avère l'outil le plus adéquat pour des tâches de micromanipulation. Il se trouve que parmi le panel d'imageurs décrits ci-dessus, le microscope photonique est le seul dispositif de vision passif capable d'apercevoir des micro-objets de taille de $1\ \mu\text{m} \rightarrow 1\ \text{mm}$ de manière déportée par rapport à l'espace de travail. La question qui se pose à présent : est-ce-qu'une station de micro-assemblage doit être équipée d'un seul microscope optique, de deux ou plus ? D'après un rapport de recherche de *Kaushik* de l'Institut de Technologie de Bombay en Inde [\[Kau08\]](#) sur les outils de vision dans le domaine du micro-assemblage, environ 50 % des stations sont équipées d'un seul imageur tandis que l'autre moitié bénéficie d'un système de vision dit distribué. Un système distribué peut donc comporter deux ou plusieurs microscopes optiques ou caméras équipées de zoom. Ce choix de multiplier les capteurs de vision autour de l'espace de travail est dû à deux spécificités majeures du microscope photonique qui sont la faible profondeur de champ et le faible champ de vision. Dans la section suivante, nous étudierons les spécificités du microscope optique pour en comprendre davantage le fonctionnement.

2.5 Microscope optique sur les stations de micro-assemblage et ses spécificités

Nous avons mis l'accent sur l'importance du microscope dans le micro-assemblage dans la section précédente, place maintenant à la compréhension de son fonctionnement et surtout de ses propriétés. Un microscope optique conventionnel est constitué d'un objectif et d'un oculaire assimilés à des lentilles minces convergentes de même axe, (voir figure [FIG. 2.11](#)). Sur ce schéma simplifié, l'objectif donne du sujet observé A' une image réelle A'' renversée et très agrandie qui prend la place du sujet (objet réel) par rapport à l'oculaire. L'oculaire donne une image très agrandie A''' appelée image virtuelle. Cette image est située à 25 cm derrière l'extrémité de l'oculaire et dans l'axe de celui-ci. L'ensemble du grandissement de l'objectif et du grossissement de l'oculaire peut atteindre $2000\times$.

Ce qui a été présenté ici est un schéma correspondant à un microscope de base grand public. Les microscopes, qui équipent les stations de micro-assemblage, sont beaucoup plus complexes. Au montage de base vient s'ajouter un jeu de lentilles permettant de

¹²SNOM : Scanning Near-field Optical Microscope, de l'anglais

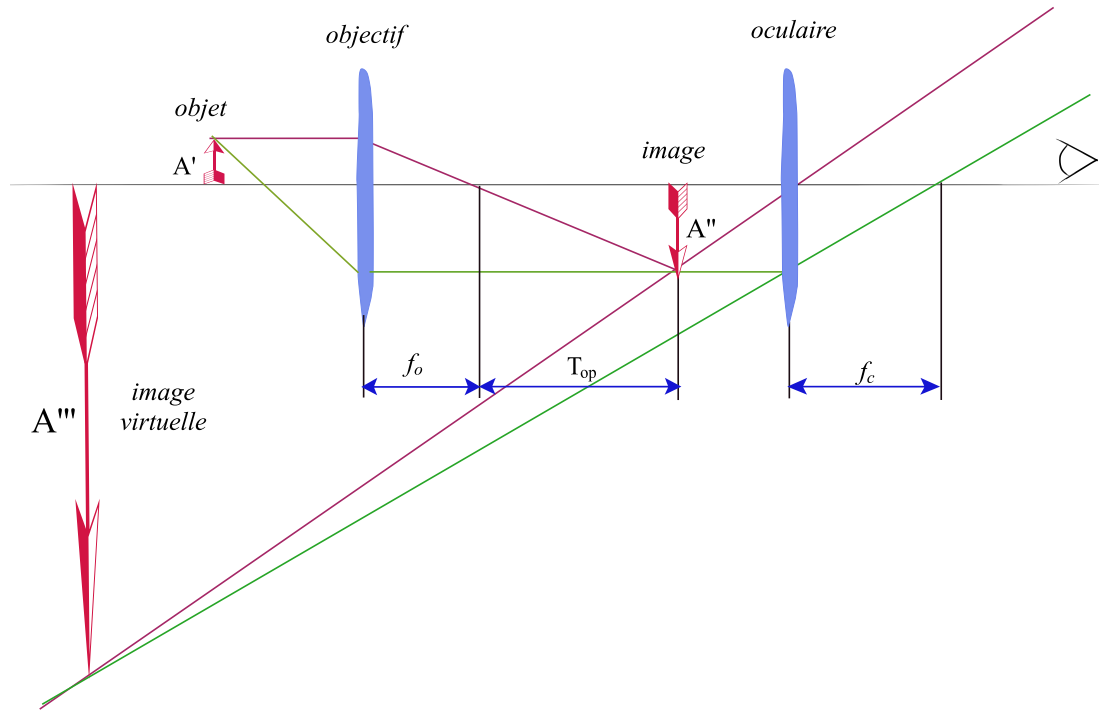


FIG. 2.21 – Schématisation d'un microscope photonique de base.

réduire considérablement les déformations géométriques et les aberrations chromatiques. Cependant, en mode vidéo microscopie l'image (A'') est formée sur le capteur. Cela revient à dire que l'oculaire n'est pas pris en compte en micromanipulation. Cela dit, du point de vue optique, les caractéristiques du microscope photonique restent inchangées. Le choix des lentilles, qui composent le dispositif, modifie les performances et les spécificités de celui-ci.

La performance recherchée dans un microscope photonique provient de ses propriétés de fort pouvoir de résolution et de fort grandissement. Toutes les autres propriétés, dans un contexte de micro-assemblage, sont apparentées à des contraintes à traiter, que ce soit l'encombrement, la faible distance de mise au point, la faible profondeur de champ, le faible champ de vision ou encore la forte dépendance à l'illumination. Cela fait beaucoup de paramètres et contraintes à prendre en compte dans l'implémentation d'outils de vision dédiés à l'inspection, la surveillance, le contrôle-qualité ou encore l'automatisation des tâches de micromanipulation par des commandes référencées capteur. Pour répondre à ces questions, nous allons présenter les différentes propriétés d'un microscope photonique. On trouve leurs descriptions dans plusieurs ouvrages d'optique notamment dans [SS92] et [Det97] ou dans des publications scientifiques traitant du problème de l'utilisation du microscope optique sur les stations de micro-assemblage comme [BF04] et [YGN05]. Cette présentation nous permettra de mieux comprendre les répercussions directes en micro-assemblage.

2.5.1 Faible profondeur de champ

Définition.3.5.1 : la profondeur de champ (PdC) correspond à la zone de l'espace dans laquelle doit se trouver le sujet à observer pour que l'on puisse en obtenir une image que l'œil (ou un autre système optique) accepte comme nette. L'étendue de cette zone dépend de nombreux paramètres internes (l'optique constituant le dispositif) et externes (longueur de l'onde de l'illumination utilisée). C'est la propriété la plus importante en microscopie photonique.

La relation mathématique qui donne la Profondeur de Champ (PdC) est la suivante :

$$PdC = (n \cdot \lambda / ON^2) + (n \cdot e / \Gamma \cdot ON) \quad (2.3)$$

où, n est l'indice de réfraction de l'objectif et ON l'ouverture numérique qui règle le taux de lumière à laisser passer dans l'objectif. Le taux de lumière est contrôlé par l'élément connu sous le nom du diaphragme. D'après la relation (2.3), plus l'objectif laisse passer de la lumière dans l'objectif, plus la PdC diminue et inversement un diaphragme, plus fermé s'adjoint une PdC plus importante. λ représente la longueur d'onde de la source d'illumination utilisée. Nous remarquons que, pour espérer augmenter la PdC d'un objectif donné, il faut utiliser des sources de lumière avec une longueur d'onde proche de l'ultraviolet. Le paramètre e est donné par la résolution (à ne pas confondre avec le pouvoir de résolution du microscope optique) de la caméra, qui permet de faire une acquisition numérique pour une observation sur un moniteur (écran) et de faciliter le traitement des images acquises. Et enfin, le grandissement Γ est, malencontreusement, directement lié à la profondeur du champ. Ainsi, si nous cherchons à élever le grandissement du microscope pour visualiser davantage de détails et cela pour des raisons de précision lors des tâches de micromanipulation ou de micro-assemblage, la PdC diminue drastiquement. Il est à noter que pour un très fort grandissement Γ , le deuxième terme de l'équation (2.3) tend vers 0. Il ne reste donc que le premier terme de la relation, qui tend vers une valeur fixe de 400 nm. Ce dernier chiffre représente la plus petite valeur de la profondeur de champ d'un système de microscopie à champ lointain et photonique.

Après avoir pris connaissance de la problématique de la faible profondeur de champ des microscopes optiques, la question suivante se pose : quelles sont les répercussions sur les approches par asservissement visuel pour faire du micro-assemblage, sachant que celui-ci comporte des tâches de positionnement (planaire ou spatiale), d'orientation (planaire ou spatiale) ou d'insertion (emboîtement de type descente verticale d'une pièce **A** dans une pièce **B**) ? D'autres types de tâches de micromanipulation posent problème tels que les cycles de prise-dépose (cycle en forme de **U** inversé) dont la partie transfert souffre de l'absence d'information sur la *profondeur de la scène*.

La figure FIG. 2.22 montre la PdC sur un microscope optique de type Leica MZ16A équipé d'un zoom 10×. Nous remarquons à travers cette figure que si nous voulons visualiser (focaliser) la partie supérieure du microcomposant (bague d'un microroulement

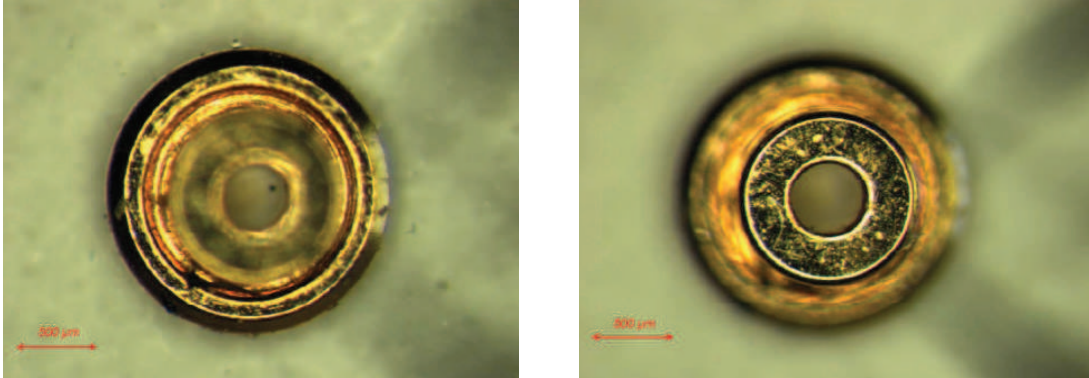


FIG. 2.22 – Illustration de la faible profondeur de champ d'un microscope optique à $10\times$.

d'une montre), la partie inférieure est totalement floue et inversement, quand cette dernière est nette, la partie supérieure est floue.

2.5.2 Faible champ de vision

Le Champ de Vision (CdV) est la partie de la scène vue par le système de perception. En microscopie, le champ de vision est faible et ne permet pas au système de vision de percevoir l'intégralité de l'espace de travail. Le champ de vision s'écrit :

$$CdV = (T_s/\Gamma) \quad (2.4)$$

avec T_s la taille du capteur et de l'objectif, Γ le grandissement de l'objectif. D'après la relation (2.4), plus le microscope a un grandissement important, plus le CdV est faible. Le grandissement étant directement lié à la résolution du microscope, plus le grandissement est important, meilleure est la résolution, ce qui permet d'espérer une meilleure précision lors des tâches de micro-assemblage, de surveillance ou encore de contrôle-qualité. Cependant, si la résolution est importante, la perception sera localement centrée, ce qui engendra une absence de perception et d'interaction sur ce qui se passe autour de la zone perçue. Prenons l'exemple d'un assemblage automatique sur une station de micromanipulation, les microcomposants sont, la plupart du temps, disposés en palette de quelques dizaines voire centaines de micro-objets. La première phase du processus d'assemblage consiste à détecter et à détacher (avec le préhenseur) des micro-objets pour les transporter vers la zone de micro-assemblage. Pour cette première phase, nous avons besoin à la fois d'une vue globale pour repérer les micro-objets (faible résolution) et d'une vue plus locale pour les détacher (haute résolution). Deux solutions sont à envisager :

- La première technique repose sur l'utilisation de plusieurs imageurs qui comprennent un ou plusieurs microscopes optiques à fort grandissement (vue locale) et des caméras équipées d'objectifs à faible grandissement (vue globale). Une commutation est implémentée pour basculer entre les imageurs lors des différentes tâches de micro-assemblage.

Cette approche est appelée approche *multi-imageurs et multi-échelle* ¹³,

- La deuxième technique consiste dans l'utilisation d'un microscope équipé d'un zoom motorisé (dynamique). L'objectif est changeable par le biais d'une tourelle motorisée. La commande associée à ce genre de zoom porte le nom de commande référencée vision *multi-échelle avec zoom dynamique intégré* ¹⁴. Nous reviendrons sur cette approche dans le chapitre [4] et [5].

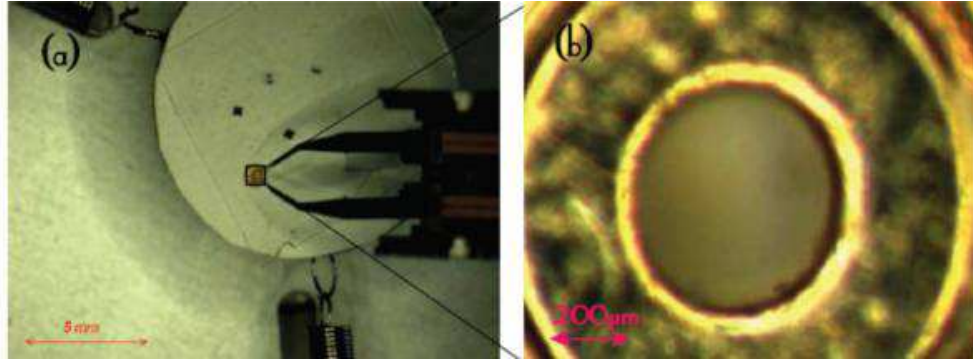


FIG. 2.23 – Illustration du faible champ de vision d'un microscope optique.

La figure FIG. 2.23 illustre deux images prises avec un microscope optique. Le champ de vision sur l'image de gauche est de 25 mm × 20 mm pour une résolution de 19 µm/pix et l'image de droite correspond à un champ de vision 0.9 mm × 0.7 mm avec une résolution de 0.9 µm/pix.

2.5.3 Encombrement du microscope photonique

Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, on cherche toujours à avoir un fort grandissement du système de vision pour une meilleure résolution donc une meilleure précision. Cependant, un fort grandissement signifie un encombrement très important du microscope optique. Regardons de plus près la relation suivante définissant le grandissement Γ :

$$\Gamma = \frac{l_t}{f_o} \left(1 + \frac{a_o}{f_c} \right) \quad (2.5)$$

ce qui donne :

$$l_t = \frac{\Gamma \cdot f_o \cdot f_c}{f_c + a_o} \quad (2.6)$$

avec f_o la longueur focale de l'objectif et f_c celle de l'oculaire, a_o la distance minimale de la mise au point et l_t la longueur du tube qui correspond à la distance entre les foyers

¹³multi-views and multi-scale, de l'anglais

¹⁴multi-scale with dynamic zoom, de l'anglais

de l'objectif et de l'oculaire. La relation (2.6) montre que la longueur du tube est directement liée au grandissement Γ . Cela dit, plus le grandissement est important plus la longueur du tube est importante. Pour exemple, la longueur du tube correspondant à un grandissement de $10\times$ est de 200.8 mm.

Dans le concept de *micro-usine* (usine portable) introduit pour la première fois par des chercheurs japonais du Mechanical Engineering Laboratory (MEL) au début des années 1990, un des objectifs était de développer des stations d'assemblage dont les dimensions soient de l'ordre de grandeur de celles d'une valise. Dans ce contexte, l'utilisation d'un microscope optique pose problème du fait de son encombrement. Il est à noter, que sur une station de micro-assemblage équipé d'un seul microscope optique intégré de type Leica MZ16A, l'espace occupé est déjà d'environ 500 mm \times 300 mm \times 200 mm. Cela représente approximativement 75 % du volume total de la station. Imaginez à présent, si nous devions équiper la station de micro-assemblage d'un système distribué de vision (deux microscopes optiques ou plus).

2.5.4 Faible distance de mise au point

La distance de mise au point correspond à la distance maximale acceptable entre l'objet observé et la première lentille de l'objectif, appelée aussi la distance de travail du microscope photonique. Une observation nette de la scène n'est pas possible si la distance de mise au point n'est pas respectée. Cette distance est directement liée à l'Ouverture Numérique (ON) du microscope et elle est donnée par la relation suivante :

$$d = \frac{\lambda}{ON \cdot \sin(\alpha_o)} \quad (2.7)$$

si l'ouverture numérique vaut $ON = n \cdot \sin(\alpha_o)$, alors l'équation (2.7) peut s'écrire :

$$d = \frac{\lambda}{n \cdot \sin^2(\alpha_o)} \quad (2.8)$$

avec α_o le demi-angle d'ouverture de l'objectif, d la distance de travail correspondant à la distance entre l'objectif du microscope et le sujet observé. Pour avoir une résolution de qualité avec un grandissement maximal, il faut collecter le plus de lumière possible. Cela implique que plus le grandissement Γ est grand, plus l'ouverture numérique ON doit être importante. La limite de l'ouverture numérique tend vers $\frac{\pi}{2}$, le seul paramètre, restant pour augmenter la collecte de lumière, est une distance de travail très courte. Cela revient à dire que pour un fort grandissement, la distance de travail diminue considérablement. Pour exemple, pour un microscope photonique équipé d'un objectif avec un grandissement de $20\times$, la distance de travail vaut 20 mm. La figure FIG. 2.24, illustre parfaitement la faible distance d pour un grandissement de $10\times$.

L'absence d'un espace de travail considérable entre l'objectif et la table de travail (table de positionnement) empêche le passage du système de préhension entre ces deux derniers pour manipuler correctement (FIG. 2.24). Il n'est également pas évident de

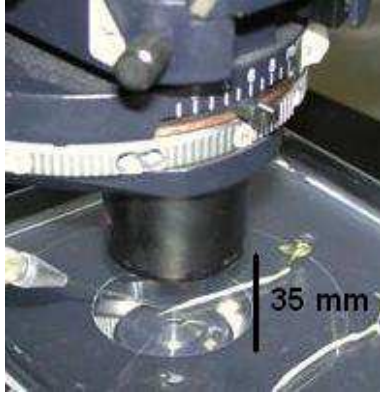


FIG. 2.24 – Illustration de la faible distance de travail d'un microscope photonique à 10 \times .

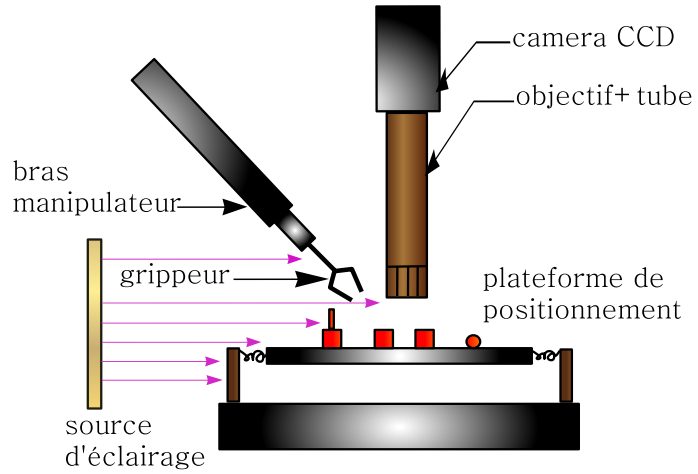


FIG. 2.25 – Illustration du problème lié à la faible distance de travail.

multiplier les imageurs autour de la table de positionnement ainsi que les sources d'illumination. Pour un grandissement très important, il est vivement conseillé d'utiliser des microscopes photoniques équipés d'objectifs spéciaux appelés "objectifs longue distance". Sinon, une autre solution envisageable consiste à remplacer le microscope conventionnel par un microscope optique dit *inversé*. Dans ce cas, l'organe de vision observe, en même temps, par le dessous l'échantillon posé sur une plaquette de verre et le manipulateur (gripper). Un exemple de cette configuration est donné dans [FTDFP08]. Cependant, le fait d'observer à travers une plaquette de verre cause une diminution de la qualité des images qui souffrent déjà d'un manque de contraste pour les forts grandissements. Cela rend le développement des algorithmes et des techniques de traitement d'images plus complexe.

2.5.5 Relation entre le contraste et l'illumination

En général, il existe trois types d'éclairage : l'éclairage épiscopique, diascopique et coaxial. En microscopie photonique et plus précisément sur les stations de micro-assemblage, l'éclairage diascopique n'est pas concevable pour les vues de dessus (les plus utilisées). Pour ce qui concerne l'éclairage épiscopique, il se résume à l'utilisation d'une sorte de bague de LEDs ¹⁵ autour de l'objectif. Cette dernière technique n'assure pas une parfaite illumination pour les objectifs à grandissement important, donc il est souvent remplacé par un éclairage coaxial. Néanmoins, le réglage de l'illumination de la scène est toujours une partie sensible dans un système de vision conventionnel et encore plus en microscopie optique. Parmi les problèmes, nous pouvons faire référence à la présence d'ombres, à l'illumination non-homogène, à la stabilité des éclairages ainsi qu'à

¹⁵Light Emitting Diode

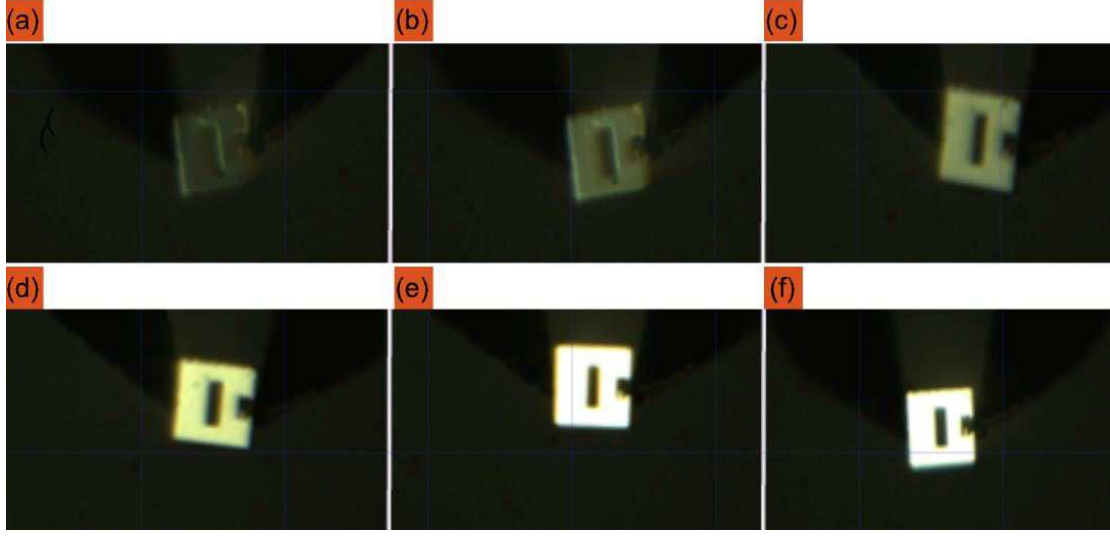


FIG. 2.26 – Séquence d’images représentant le changement du contraste sur un micro-objet en silicium lors de sa manipulation.

l’augmentation de la température dans l’espace de travail. Nous reviendrons plus tard sur cette dernière contrainte. Pour ce qui concerne la qualité du contraste des images microscopiques, regardons de plus près la relation suivante :

$$C_I \propto \left(\frac{ON}{\Gamma} \right) \quad (2.9)$$

où C_I est le contraste de l’image I obtenue par le microscope photonique. Le contraste est directement proportionnel à l’ouverture numérique ON et inversement proportionnel au grandissement du microscope. Le grandissement et l’ouverture numérique sont liés, par contre le grandissement évolue plus rapidement. Par conséquent, plus le microscope a un grandissement élevé, plus les images obtenues auront un faible contraste.

Dans notre cas, les microcomposants sont fabriqués en salle blanche par des techniques de microfabrication sur des wafers en silicium. Le fait de changer l’orientation du micro-objet lors de l’assemblage fait passer d’un mode absorption des rayons lumineux à mode réflexion totale de la lumière.

La figure FIG. 2.26 montre le changement du contraste sur un micro-objet en silicium de $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ lors de sa manipulation en vue d’un assemblage. Nous constatons qu’il passe d’un cas où il est quasiment *noir* à un cas miroitant parfaitement la lumière issue de l’éclairage, donc quasiment *blanc*. Le *dôme* représenté sur la figure FIG. 2.27 montre l’évolution du contraste en fonction de la variation des deux angles de rotation *tangage* et *roulis*. Ce changement de contraste impressionnant complique d’avantage la tâche des algorithmes de traitement d’images. Les approches de base de type détection de primitives visuelles (contours, points d’intérêt, région ROI, ...) ne sont plus suffisantes.

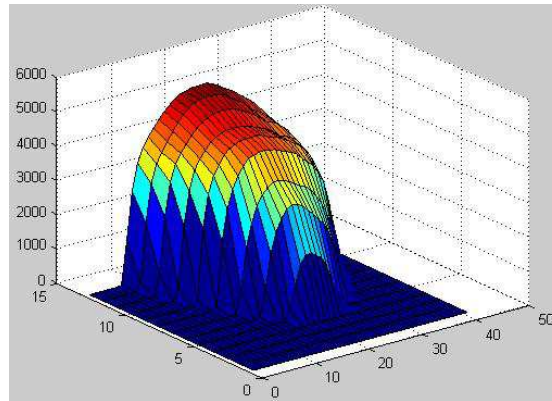


FIG. 2.27 – Changement du contraste d’une pièce de silicium pour différentes orientations : tangage $[0^\circ \rightarrow 15^\circ]$ et roulis $[0^\circ \rightarrow 50^\circ]$.

spécificités/grandissement	2×	5×	10×	20×	50×	100×
distance de travail (mm)	34	34	33.5	20	13	6
résolution (μm)	5	2	1	0.7	0.5	0.4
profondeur du champ (μm)	91	14	3.5	1.6	0.9	0.6
diamètre du champ de vision (mm)	9	3.6	1.8	0.9	0.36	0.18
poids (g)	220	230	240	270	290	320

TAB. 2.1 – Tableau des caractéristiques des objectifs Mitutoyo Plan à longue distance de travail, [Ber07].

Si nous voulons apporter une solution matérielle à ce problème de la dépendance du contraste de l’image, il faut que le système d’éclairage d’une scène de micro-assemblage soit tout aussi pensé que le système de vision. Pour obtenir une illumination globale de la scène, en plus des éclairages intégrés dans les microscopes photoniques, il faut des sources extérieures très diffuses pour éclairer chaque partie des pièces manipulées. Une fois de plus, nous ajoutons des éléments à la station de micromanipulation augmentant ainsi son encombrement.

Le Tableau 2.1 montre les caractéristiques principales des microscopes optiques de marque Mitutoyo équipés d’objectifs à longue distance. Les stations de micro-assemblage sont majoritairement équipées de ce genre de microscopes optiques. Après l’analyse du tableau, nous constatons que les caractéristiques importantes telles que la profondeur de champ, le champ de vision et la distance de travail, décroissent de façon exponentielle en fonction du grandissement.

Malgré toutes les contraintes qui découlent de l’utilisation d’un microscope photonique, il reste sans aucun doute l’outil le mieux adapté à notre application, même si, pour une bonne utilisation, une très bonne maîtrise est nécessaire. Mais rien que pour la résolution offerte par la vision microscopique et le fait que cet outil est le seul système de

vision passif capable d'apercevoir un sujet de l'extérieur de l'espace de travail nous suffit pour faire le choix d'utiliser ce type de microscope. Pour ce qui concerne les contraintes liées à l'optique physique qui régit la microscopie photonique, notamment la faible profondeur de champ, le faible champ de vision, le manque de contraste et l'encombrement, des solutions seront proposées. Celles-ci seront de type logicielles (algorithmiques) ainsi que matérielles et seront développées dans les chapitres suivants. Il faut savoir que le passage de l'échelle macro à l'échelle micro ne consiste pas en un simple transfert de technologies ou de techniques. Bien au contraire, tout est à revoir des techniques de perception à celles de l'action.

D'autres questions se posent : est ce que le franchissement de la barrière du millimètre n'intervient pas au niveau de la physique qui régit le micromonde ? Le comportement d'un micro-objet est-il le même que celui d'un macro-objet ? Que deviennent les forces comme la gravité, le poids et l'inertie lorsque le microcomposant ne pèse que quelques microgrammes ?

Dans la section suivante, nous nous pencherons sur ces questions et essaierons de comprendre la physique du micromonde. Mieux comprendre cette physique, nous permettra d'aborder les tâches micromanipulation et de micro-assemblage avec plus de maîtrise. Cela veut dire, mieux approcher un microcomposant, mieux le saisir, mieux le déposer, mieux le mettre en contact avec d'autres, etc.

2.6 Physique du micromonde

L'échelle de la physique de la micromanipulation se trouve proche de la limite inférieure de la mécanique classique. Généralement, les lois de la physique newtonienne sont toujours valables et les effets quantiques négligés. Cependant, il se trouve que ces deux limites entre la physique classique et la physique quantique sont difficilement chiffrables [Fey95], [Fea95]. À l'échelle microscopique, nous constatons une inversion importante des forces : les forces surfaciques deviennent prépondérantes par rapport aux forces volumiques. Cette propriété est d'autant plus marquée que l'on descend du millimètre vers le micromètre. Pour information, les forces volumiques regroupent le poids et l'inertie et les forces surfaciques font référence aux forces de Van der Waals, aux forces électrostatiques et aux forces capillaires. La figure [FIG. 2.28](#) illustre parfaitement cette inversion soudaine de la prépondérance des forces dans le micromonde. Cette inversion peut s'expliquer par le fait que la décroissance du volume ($V = a^3$), dans l'intervalle $[0,1]$, est plus rapide que celle de la surface ($S = a^2$). Ainsi, les forces volumiques sont négligeables en microscopie. Cela modifie de façon drastique la mécanique du contact et les interactions entre les matériaux ; entre un micro-objet et son semblable à l'insertion, entre un micro-objet et le porte-échantillon à la dépose, et entre les doigts du gripper ¹⁶ et un micro-objet à la préhension. Il est clair et indispensable de mettre en œuvre des stratégies novatrices (en plus de celles de la vision et de la commande) appropriées tant au point de vue de la manipulation (prise et dépose) que de l'assemblage (insertion). Ci-dessous, une partie

¹⁶système de préhension

sera consacrée à la compréhension des microforces (forces surfaciques) qui seront prises en compte dans les chapitres traitant de la micromanipulation et du micro-assemblage automatiques.

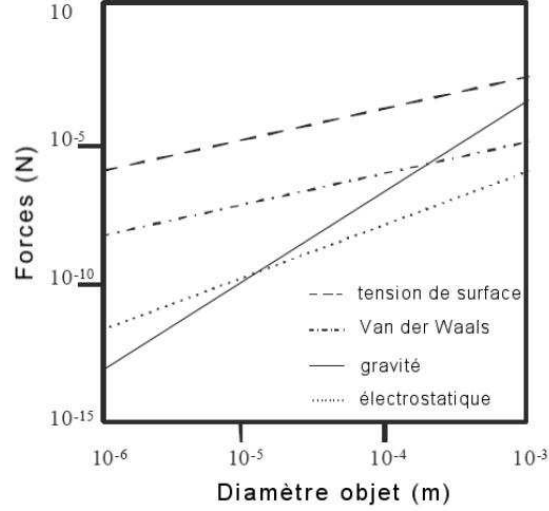


FIG. 2.28 – Inversion de l'importance des forces dans le micromonde [Fea95].

2.6.1 Forces surfaciques

Les forces surfaciques se décomposent en trois classes et doivent être prises en considération lors du micro-assemblage. Ces trois classes sont :

Forces de Van der Waals : ces forces ont été nommées en l'honneur du physicien hollandais, *Johannes Diderik Van der Waals* qui a été récompensé par le prix Nobel de physique en 1910. Ces forces s'expliquent par une interaction de faible intensité entre atomes et molécules d'un ou plusieurs matériaux donnés. En effet, le potentiel d'interaction moléculaire w est donné par la sommation entre toutes les contributions attractives et répulsives. Sa forme générale est donnée par la relation suivante :

$$w(r) = \frac{A}{r^n} - \frac{B}{r^m} \quad (2.10)$$

où r est la distance d'interaction entre deux corps considérés, m et n sont, respectivement, deux entiers qui désignent la partie attractive et la partie répulsive. Une autre forme de la force de Van der Waals (la plus utilisée) est donnée par :

$$w(r) = 4\tau \left\{ \left(\frac{\xi_0}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\xi_0}{r} \right)^6 \right\} \quad (2.11)$$

où ξ est la distance interatomique d'équilibre et τ représente la profondeur du potentiel.

Les forces attractives sont essentiellement composées des forces de Van der Waals (les forces de répulsion sont négligeables devant les forces attractives). Il existe trois

phénomènes qui induisent les forces de Van der Waals : le phénomène d'induction C_{ind} , d'orientation C_{orient} et de dispersion C_{disp} . Ces paramètres sont liés par la relation suivante :

$$w_{vdw}(r) = -\frac{C_{ind} + C_{orient} + C_{disp}}{r^6} \quad (2.12)$$

plus généralement présentée sous la forme suivante :

$$w(r) = -\frac{C_{vdw}}{r^6} = -\frac{C}{r^6} \quad (2.13)$$

Pour une compréhension plus approfondie des forces de Van der Waals, il serait intéressant de se référer aux travaux de R. Bowling [Bow86] et de L. Hecht [Hec90].

Forces capillaires : lorsque l'environnement dans lequel s'effectue la micromanipulation possède un degré d'hygrométrie supérieur à 5 %, un phénomène de condensation de vapeur apparaît [GRR06]. Cela engendre la création d'un film aqueux sur les surfaces des matériaux. Si les deux surfaces sont mises en contact, il s'avère que deux effets microscopiques apparaissent :

- Le changement des constantes de *Hamaker* des interfaces [OSR75],
- L'apparition d'une nouvelle microforce d'adhésion appelée force capillaire [AP63].

Quand deux surfaces sont mises en contact dans un environnement humide, un ménisque aqueux se crée (FIG. 2.29). Ce ménisque pose énormément de problèmes en micromanipulation. À l'origine de l'apparition des forces capillaires, on trouve la pression de *Laplace*, d'après [Mas93].

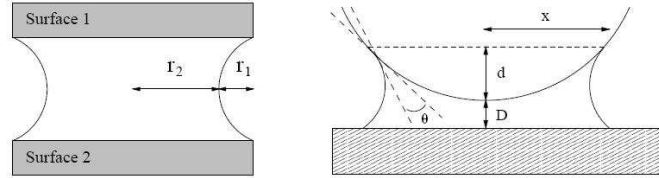


FIG. 2.29 – Illustration de l'origine des forces capillaires.

Les rayons de courbure r_1 et r_2 , dépendant de l'humidité relative p_r , sont donnés par la relation suivante (équation de *Kelvin* [Ada90]) :

$$\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)^{-1} = \frac{\gamma \cdot V}{kT \ln(p_r)} \quad (2.14)$$

avec γ la tension de surface de l'eau et V son volume molaire. D'après l'équation (2.14), plus l'humidité relative est importante, plus le rayon du ménisque est important et plus la force capillaire est importante. Cela revient à dire qu'un contrôle de l'environnement de travail en humidité est plus que nécessaire pour une meilleure maîtrise de la micromanipulation et du micro-assemblage. L'idéal est de placer les stations de micro-assemblage dans une salle blanche contrôlant les paramètres tels que l'humidité, température, air, ...

Forces électrostatiques : les forces électrostatiques posent au moins autant de problèmes que les forces capillaires en micro-assemblage. L'origine de ces forces peut venir de deux cas de figure :

- par l'interaction de *Coulomb*, lorsque des particules chargées sont en présence,
- par l'interaction de *Coulomb* due à l'apparition de charges générées par triboélectrification ¹⁷.

Pour une particule chargée qui interagit avec une surface chargée, l'interaction entre ces deux éléments est régie par la *loi de Coulomb*. La surface crée alors un champ électrique E :

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0} \quad (2.15)$$

où σ est la densité de charge surfacique, ε la densité diélectrique du milieu et ε_0 la permittivité de l'air. La force induite par le champ E est donnée par la relation suivante :

$$F = qE \quad (2.16)$$

Nous remarquons que cette force est indépendante de la distance entre les deux sujets (particule chargée et surface chargée). Néanmoins, dans le cas de deux particules chargées, la force d'interaction F_D est dépendante de la distance entre ces deux particules. Elle est donnée par :

$$F_D = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon D^2} \quad (2.17)$$

avec D la distance qui sépare les deux particules chargées et q la charge électrique. Si une charge ponctuelle q se trouve à côté d'une surface chargée, en utilisant la méthode de particule image, la relation de la force induite F_q s'écrit :

$$F_q = \frac{q^2}{16\pi\varepsilon_0\varepsilon D^2} \quad (2.18)$$

Dans le cas où les matériaux mis en jeu sont isolants avec des constantes diélectriques notées, respectivement ε_1 et ε_2 , la force image $F_{\varepsilon_1 \varepsilon_2}$ se traduit par :

$$F_{\varepsilon_1 \varepsilon_2} = \frac{q^2}{16\pi\varepsilon_1\varepsilon_0 D^2} \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{(\varepsilon_2 + \varepsilon_1)} \quad (2.19)$$

avec $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$.

Il se trouve que si la surface est conductrice, lors du contact, un transfert de charges entre le micro-objet et les doigts du gripper est provoqué. Ce phénomène d'échange de charges tend à réduire l'effet d'adhésion [Bow86]. Le transfert est d'autant plus important

¹⁷La triboélectricité (du grec *tribein* qui signifie frotter) désigne le phénomène électrostatique par lequel lorsque l'on met en contact deux matériaux de nature différente. Une partie des électrons de la surface de contact d'un des deux matériaux est transférée à l'autre et ce transfert subsiste lors de la séparation. L'effet triboélectrique peut être augmenté si l'on fournit de l'énergie mécanique en frottant les matériaux l'un contre l'autre.

lorsqu'il s'agit d'un contact entre deux matériaux différents dans l'objectif de les ramener à l'équilibre thermodynamique et ainsi d'égaliser leurs potentiels électrochimiques. Dans la plupart des expériences développées dans le cadre de ce travail de thèse, les doigts de la pince et les micro-objets à assembler sont soit réalisés dans le même matériau, c'est-à-dire le silicium (*Si*), soit dans deux matériaux différents (les micro-objets en silicium et les doigts de la pince en nickel (*Ni*)).

Le potentiel de contact entre un matériau 1 et un matériau 2 est donné par :

$$V_c = \frac{Q_1 - Q_2}{e} \quad (2.20)$$

Dans la suite de ce manuscrit, plus particulièrement au chapitre 6, nous montrerons que le simple fait de ne pas relier le support d'échantillon à la masse pose énormément de problèmes sur la partie préhension et dépose de micro-objets. À l'approche du gripper pour la saisie du micro-objet en silicium, ce dernier se trouve projeter à quelques centaines de micromètres de sa position initiale. Ceci est valable aussi lors de sa dépose, dès que les doigts du gripper s'ouvrent, le micro-objet fait un bond, encore ici, de quelques centaines de micromètres de sa position désirée.

Sans rentrer davantage dans les détails de la mécanique et notamment celle du contact, il est bon de rappeler qu'aux microforces citées ci-dessus, viennent s'adjoindre les forces appelées ***pull-off***. La définition de la force de pull-off est la suivante : Pour pouvoir détacher deux surfaces mises en contact, il faut appliquer une certaine force au moins aussi importante que la force de pull-off. Elle est dépendante à la fois des matériaux mis en contact, de l'environnement (air, vide, eau, ...), ainsi que de la température et de l'humidité.

2.6.2 Impact des microforces en micro-assemblage

L'ensemble des forces décrites ci-dessus portent le nom de forces surfaciques. Elles sont, malheureusement, responsables des difficultés non-contrôlées lors de la micromanipulation (automatique, semi-automatique et télé-opérée). Nous rappelons que la manipulation de micro-objets nécessite des sous-tâches comme : la prise, le positionnement et la dépose à des endroits bien définis avec la meilleure précision et répétabilité possibles. Ces performances ne sont atteignables que grâce à un parfait contrôle des forces de surface. Si les forces de surface sont contrôlées alors la prise d'un micro-objet s'effectuera comme pour la prise d'un macro-objet en robotique conventionnelle. Dans ce cas, lors de l'approche du préhenseur vers le micro-objet, celui-ci ne risque pas d'être projeté (ou de changer d'orientation) à cause des tensions de surface entre le préhenseur (charges positives, par exemple) et le micro-objet (charges positives). L'effet inverse se produit si les charges sur le préhenseur sont de signe différent de celles sur la surface du micro-objet ; celui-ci risque d'être attiré vers le préhenseur sans pouvoir contrôler ni son orientation, ni sa position. La sous-tâche "dépose d'un micro-objet" constitue le plus grand verrou dans le domaine de la micromanipulation avec contact. Lors de la phase dépose (lâcher), le micro-objet reste collé sur le préhenseur. Ceci s'explique par la présence de forces d'adhé-

sion entre les deux éléments (préhenseur-objet). Dans ce cas, il est quasi-impossible de déposer le micro-objet à un endroit précis ou même de le déposer tout-court. À ce jour, il n'existe guère d'instruments de mesures fiables de ces microforces. Néanmoins, il existe des travaux qui permettent de quantifier, même de façon grossière, les forces surfaciques à l'aide d'une pointe AFM, comme par exemple les travaux de Fahlbusch et al. [FSF02], de Gang et al. [GGTVV05] et Rougeot et al. [RRC05].

Une nouvelle technique consistant à minimiser et à mieux contrôler les forces surfaciques s'appuie sur la fonctionnalisation des micro-objets et/ou des doigts du gripper. Sur cette nouvelle thématique, notre département travaille en partenariat avec le laboratoire Suisse EMPA dans le cadre du projet HYDROMEL. La fonctionnalisation de surfaces consiste en un dépôt d'un composé chimique sur la surface afin de lui conférer des propriétés particulières et/ou modulables par la variation de conditions. Ces variations peuvent être appliquées, par exemple sur, la température, le choix du milieu (sec/liquide) ou de la solution liquide (pH, force ionique, composition chimique, ...).

Le but de la fonctionnalisation est de faciliter la saisie des micro-objets, par des forces attractives «contrôlées» et surtout de faciliter leur dépose. Ceci peut être fait grâce à la limitation des forces d'adhésion (si possible) ou à la création de forces répulsives «contrôlées». À travers des travaux de micromanipulation de micro-objets en silicium dans un milieu liquide, il a été montré que le fait de contrôler le pH de la solution permet de relâcher aisément le micro-objet [DRGB09]. Ces travaux sur la fonctionnalisation des surfaces ouvrent une nouvelle voie pour mieux gérer les cycles de micromanipulation et de micro-assemblage de MEMS et de MOEMS.

2.7 Conclusion

À présent, nous avons acquis une meilleure connaissance et compréhension du domaine des micro-systèmes, des besoins du marché, des approches qui peuvent être entreprises pour leurs assemblages. Les points critiques liés à l'automatisation des tâches de micromanipulation et de micro-assemblage ont été soulevés. Le point, de loin le plus important, concerne la perception et les moyens d'observation employés dans le micro-monde. Le microscope photonique s'avère l'outil le plus adéquat dans notre cas. Pour surmonter certaines contraintes liées à son utilisation, nous présenterons, par la suite, des solutions soient logicielles, soient matérielles, plus précisément sur la partie calibrage (modélisation) du microscope optique en vue de calculer les paramètres intrinsèques et extrinsèques de ce dernier. Nous mettrons l'accent sur le fait que les techniques de calibrage de microscope photonique diffèrent de celles des caméras conventionnelles. La faible profondeur de champ nous oblige dans tous les cas à utiliser des mires ou des motifs de calibrage planaires. La compréhension des microforces, qui agissent dans le micromonde lors de la manipulation et de l'assemblage, nous permet d'en minimiser les effets désagréables engendrés et ainsi d'avoir de meilleures répétabilité et précision sur les cycles de prise et dépose ou d'assemblage de MEMS et/ou de MOEMS.

Calibrage multi-chelle d'un microscope optique à l'aide d'une mire virtuelle 2D

Ce chapitre traite du problème de la modélisation du vidéo microscope photographique à zoom variable. La variation du zoom permet, en pratique, de pouvoir travailler à plusieurs échelles avec le même système d'imagerie comme l'exige le micro-assemblage : le faible zoom donne une image globale de la scène permettant de localiser les cibles les unes par rapport aux autres alors que le fort zoom en donne une image locale agrandie compatible avec la résolution nécessaire à la manipulation. La modélisation a consisté à déterminer une relation polynomiale entre le facteur de zoom et le produit facteur d'échelle par la distance focale. Les propriétés du microscope énoncées précédemment interdisant l'utilisation de mires 3D, deux types de mires 2D ont été proposés : une micromire en silicium oxydé et surtout une micromire virtuelle.

Sommaire

3.1	Introduction	50
3.2	Calibrage d'un système de vision conventionnel	51
3.3	Le microscope optique Leica MZ16A	56
3.3.1	Tour d'horizon des méthodes de calibrage de microscopes optiques	57
3.3.2	Choix de la mire de calibrage	59
	Mire réelle 2D	59
	Mire virtuelle 2D	61
3.4	Modélisation multi-échelle	63
3.4.1	Calcul des paramètres extrinsèques	64
3.4.2	Calcul des paramètres intrinsèques	66
3.4.3	Résultats du calibrage	69
3.4.4	Analyse des résultats	70
3.4.5	Quelle mire choisir pour le calibrage?	70
3.5	Conclusion	71

3.1 Introduction

Comme expliqué plus haut, le système d'imagerie utilisé comportent deux microscopes à zoom variable qu'il est nécessaire de calibrer afin de pouvoir les utiliser pour réaliser la commande du système robotique. Depuis les tous premiers travaux liés à la *vision artificielle*, la communauté de la vision par ordinateur n'a pas arrêté d'explorer les domaines d'application de cette nouvelle technologie. Ils vont de la prise de photo d'amateur à la réalité virtuelle en passant par la reconnaissance des formes, la vision 3D, le suivi et l'asservissement visuel, ...etc. Dès que le système de vision comprend deux ou plusieurs caméras (réseaux de caméras) ou pour la vision 3D en général et le suivi et l'asservissement visuel dans certains cas, la modélisation du capteur ou des capteurs de vision est nécessaire. Dans la communauté de la vision par ordinateur, la modélisation est connue sous le nom de *calibrage* pour la communauté francophone et *calibration* pour les anglo-saxons. Que désigne alors le terme calibrage d'un capteur de vision ?

Définition.3.1.1 : le calibrage d'un système de vidéo consiste en la détermination de la relation mathématique existant entre les coordonnées tridimensionnelles (3D) de points, droites ou autres primitives géométriques de la scène et les coordonnées bidimensionnelles (2D) de ces mêmes points projetés dans l'image. Le passage du repère monde (scène) (3D) au repère image (2D) se présente sous forme de deux matrices : une matrice $\mathbf{K}(3 \times 3)$ nommée matrice des paramètres intrinsèques de l'imageur et une matrice $\mathbf{D}(3 \times 4)$ appelée matrice des paramètres extrinsèques (pose de la caméra) par rapport au repère monde.

Le vidéo microscope photonique étant une source d'images optique, il peut alors être modélisé par un modèle classique appelé modèle sténopé [HM95]. Quelquefois fois, un tube allongé de longueur l_t est intercalé entre l'objectif du microscope et le plan image. Ceci, ne change pas fondamentalement le modèle. Dans la modélisation du microscope photonique, la longueur focale f est remplacée par la quantité $f_o + l_t$. Il est à noter que la longueur focale d'un microscope optique est toujours plus importante que celles des imageurs conventionnels à faible grandissement.

La réalisation du calibrage est une tâche compliquée. La première difficulté est d'ordre matérielle, c'est-à-dire la réalisation de la mire de calibrage en elle même. Il est évident que la précision du calibrage dépend directement de la précision et de la qualité de la mire employée. Concevoir une mire avec des motifs (carrés, cercles ou autres) de quelques dizaines de micromètres est une tâche ardue qui ne peut se faire qu'avec des procédés microtechniques (lithographie) en salle blanche. La deuxième difficulté est directement liée à la faible profondeur de champ de la vision microscopique. Les techniques de calibrage traditionnelles reposent sur l'utilisation de mires 3D, généralement deux plans perpendiculaires portant des motifs blancs sur fond noir ou l'inverse. Faute de mire 3D, une mire 2D peut être utilisée. Dans ce cas, plusieurs images sont acquises selon différentes orientations spatiales de la mire planaire pour constituer un ensemble de points métriques de la scène. Deux autres solutions ont été retenues pour le choix de la mire de calibrage pour permettre le calibrage du microscope photonique.

3.2 Calibrage d'un système de vision conventionnel

Avant de commencer à décrire la méthodologie de calibrage adoptée dans notre cas, essayons d'abord de comprendre le calibrage d'une caméra CCD conventionnelle c'est-à-dire d'une caméra CCD munie d'un objectif standard, non microscopique. Comme il a été déjà mentionné dans la définition du calibrage, calibrer la caméra revient à déterminer la transformation $(\mathbb{R}^3, \mathbb{R}^2)$ qui permet d'exprimer sous une forme analytique le processus de formation d'images. Dans la littérature, nous trouvons plusieurs types de projection d'image : orthographique, orthographique à l'échelle, para-perspective et perspective. C'est ce dernier type de projection qui a retenu notre attention pour sa meilleure adéquation avec la réalité physique du capteur de vision. En ce qui concerne le modèle optique correspondant à notre système de vision en particulier ou à presque tous les imageurs, il s'agit du modèle sténopé ¹ [FLP01]. Le modèle sténopé repose sur le fait qu'il existe un trou de petite taille à travers lequel tous les rayons lumineux passent pour aller se projeter sur une surface (le capteur CCD) pour former l'image inversée de la réalité extérieure. La figure FIG. 3.1 illustre le modèle sténopé avec une petite modification liée au fait que le plan image est sensé être derrière le repère caméra.

¹pinhole model, de l'anglais

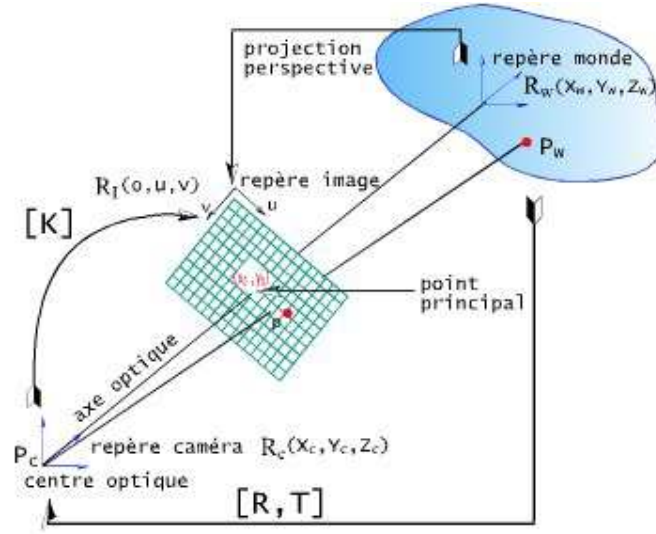


FIG. 3.1 – Notation des différents repères.

Soient les notations suivantes :

- $\mathcal{R}_w (X_w, Y_w, Z_w)$ le repère lié à la mire de calibrage,
- $\mathcal{R}_c (X_c, Y_c, Z_c)$ le repère caméra,
- $\mathcal{R}_I (o, u, v)$ le repère image situé en haut à gauche de l'image,
- $\mathcal{R}_r (x, y, z)$ le repère rétinien ayant pour origine le point principal $P_p (x_0, y_0)$.

La mise en forme des équations de calibrage est une succession de changement de repères entre le repère monde \mathcal{R}_w lié à la mire de calibrage et le repère image (o, u, v) . Le premier changement de repère permet de passer du repère $\mathcal{R}_w (X_w, Y_w, Z_w)$ au repère caméra $\mathcal{R}_c (X_c, Y_c, Z_c)$. Géométriquement parlant, cela revient dans un premier temps ; à projeter les points 3D \mathbf{P}_w , dont nous connaissons parfaitement la métrique, dans le repère \mathcal{R}_c pour obtenir les points 3D \mathbf{P}_c . Cette transformation est rigide et elle est composée d'une rotation et d'une translation. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{P}_c = \mathbf{D} \mathbf{P}_w \quad (3.1)$$

où $\mathbf{D}(3 \times 4)$ est appelée également la matrice de transformation homogène entre les deux repères. Elle regroupe les paramètres extrinsèques de la caméra par rapport au repère monde \mathcal{R}_w . Cette matrice vaut :

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

La matrice $\mathbf{R}(3 \times 3)$ est la combinaison de trois rotations successives \mathbf{R}_x , \mathbf{R}_y et \mathbf{R}_z , respectivement, autour des axes X , Y et Z (3.3). Les angles de rotation autour de ces axes sont respectivement notés : α , β et γ .

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \quad (3.3)$$

avec les matrices de rotation autour de chaque axe qui sont données par :

$$\mathbf{R}_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \text{ (rotation autour de l'axe } \mathbf{X} \text{)} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \text{ (rotation autour de l'axe } \mathbf{Y} \text{)} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ (rotation autour de l'axe } \mathbf{Z} \text{)} \quad (3.6)$$

La multiplication de ces matrices donne la matrice de rotation totale \mathbf{R} (3.7). Par définition, on peut dire qu'une matrice de rotation est une matrice orthogonale, que son déterminant est égal à 1 et que $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^\top$.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Afin de ne pas surcharger l'écriture nous préférons utiliser la notation suivante pour la matrice \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

La deuxième partie de la matrice homogène \mathbf{D} de l'équation (3.2) concerne le vecteur de translation \mathbf{T} :

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_x \\ \mathbf{T}_y \\ \mathbf{T}_z \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

En résumé, les points 3D projetés (en coordonnées homogènes) dans le repère de la caméra sont accessibles par :

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} + \mathbf{T} \quad (3.10)$$

À présent les points $\mathbf{P}_c = (X_c, Y_c, Z_c)$ exprimés dans le repère caméra doivent être projetés dans le repère image $\mathcal{R}_I(x, y, z)$. Cette projection est perspective. Cela conduit aux équations de projection suivantes :

$$x = \frac{X_c f}{Z_c} \quad (3.11)$$

$$y = \frac{Y_c f}{Z_c} \quad (3.12)$$

$$z = f \quad (3.13)$$

Une écriture matricielle de ces équations homogènes conduit à la formulation suivante :

$$\begin{pmatrix} sx \\ sy \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

avec l'introduction du paramètre s multiplicatif pour le passage de \mathbb{R}^3 vers \mathbb{R}^2 .

Il reste désormais une dernière étape pour passer du repère rétinien \mathcal{R}_r ayant pour origine, le point principal (o, x_o, y_o) au repère image $\mathcal{R}_I(o, u, v)$, (voir figure FIG. 3.2).

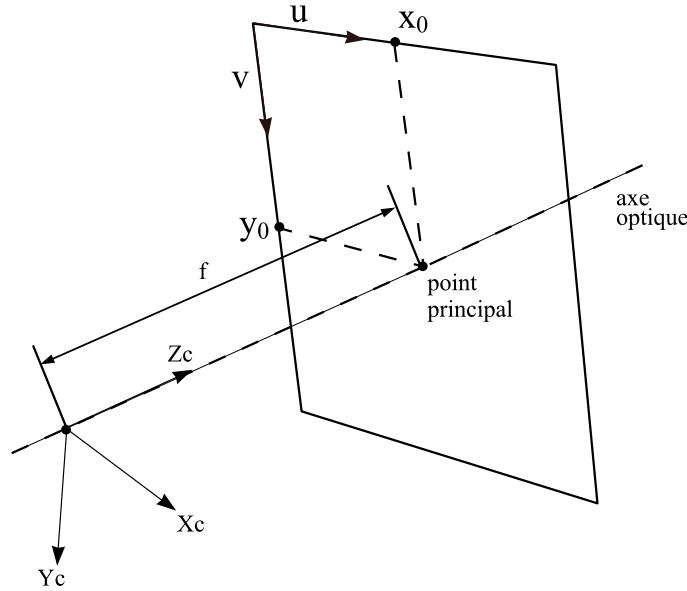


FIG. 3.2 – Système de coordonnées sur la matrice CCD.

Pour réaliser le passage de \mathcal{R}_r dans \mathcal{R}_I , une transformation affine représentant un changement d'échelle et une translation incluant la différence de pas suivant les coordonnées x et y (la coordonnée z étant nulle) sont nécessaires. Ce changement de repère fait

intervenir, d'une part la forme du pixel élémentaire (donnée par les facteurs d'échelle k_x et k_y) du capteur CCD et d'autre part, la cadence d'échantillonnage du signal vidéo. La matrice de changement d'échelle qui permet de passer des coordonnées pixelliques aux coordonnées métriques est donnée par (3.15).

$$\begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/d_x & 0 & x_0 \\ 0 & 1/d_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} sx \\ sy \\ s \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

avec $d_x = 1/k_x$ et $d_y = 1/k_y$; (x_0, y_0) représente les coordonnées (en pixel) dans l'image, de l'intersection de l'axe optique de la caméra et du plan image. Ce point est appelé, également, le point principal ou encore le centre optique.

En additionnant les deux derniers changements de repère, en l'occurrence le passage entre le repère caméra \mathcal{R}_c vers le repère rétinien \mathcal{R}_r suivi du changement de repère entre ce dernier et le repère image \mathcal{R}_I (x, y, z) donnés par les équations (3.13) et (3.15), nous obtenons la matrice $\mathbf{K}(3 \times 3)$ suivante :

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_x f & 0 & x_0 \\ 0 & k_y f & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Cette matrice est appelée la matrice des paramètres intrinsèques de la caméra. Cependant, il reste un détail à rajouter pour obtenir une modélisation complète des paramètres intrinsèques de la caméra. Dans le cas de pixels non-rectangulaires, il y a un paramètre qui intervient qui est θ . En effet, θ est l'angle entre les deux axes u et v du repère image. Alors, la matrice \mathbf{K} devient :

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_x f & -k_x f \cos \theta & x_0 \\ 0 & k_y f / \sin \theta & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

La modélisation totale de la caméra regroupant à la fois les paramètres intrinsèques et les paramètres extrinsèques est donnée par :

$$\begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = \mathbf{K}_{3 \times 4} \cdot \mathbf{D}_{4 \times 4} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

Le nombre de paramètres à déterminer une fois la problématique posée, est de six pour les paramètres extrinsèques ($\alpha, \beta, \gamma, \mathbf{T}_x, \mathbf{T}_y$ et \mathbf{T}_z) et de cinq pour les paramètres intrinsèques ($k_x \cdot f, k_y \cdot f, x_0, y_0$ et θ). Plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature concernant la résolution du problème de calibrage. Roger Y. Tsai [Tsa87] a présenté une méthode très complète et détaillée sur la méthodologie à suivre pour aboutir à une modélisation précise et complète. Faugeras et Toscani [OG87] ont proposé une méthode linéaire qui présente l'avantage de ne pas demander de valeurs initiales pour trouver une

solution. Une autre approche similaire plus connue sous le nom de DLT ² a été introduite par la communauté photogrammétrique dans les années 1970 [Fai75]. Beaucoup de méthodes développées par la suite se sont inspirées de ces travaux.

Avant d'entamer le calibrage d'un microscope photonique en général et en particulier pour une application de commande par asservissement visuel, les questions suivantes doivent être posées :

- Quels sont les points de similarité entre la méthodologie de calibrage d'une caméra conventionnelle et celle d'un microscope photonique ?
- Quels sont les paramètres dont nous aurons besoin ?
- Quelle mire utilisée ?
- Comment procéder pour effectuer un calibrage multi-échelle ?

Dans la section suivante, nous présentons le système de vision dont est équipée la station de micro-assemblage utilisée pour valider les travaux présentés dans ce manuscrit. Nous tentons de comprendre son fonctionnement pour mieux le modéliser. Un bref état de l'art est présenté sur les techniques de calibrage de ce type d'appareil.

3.3 Le microscope optique Leica MZ16A

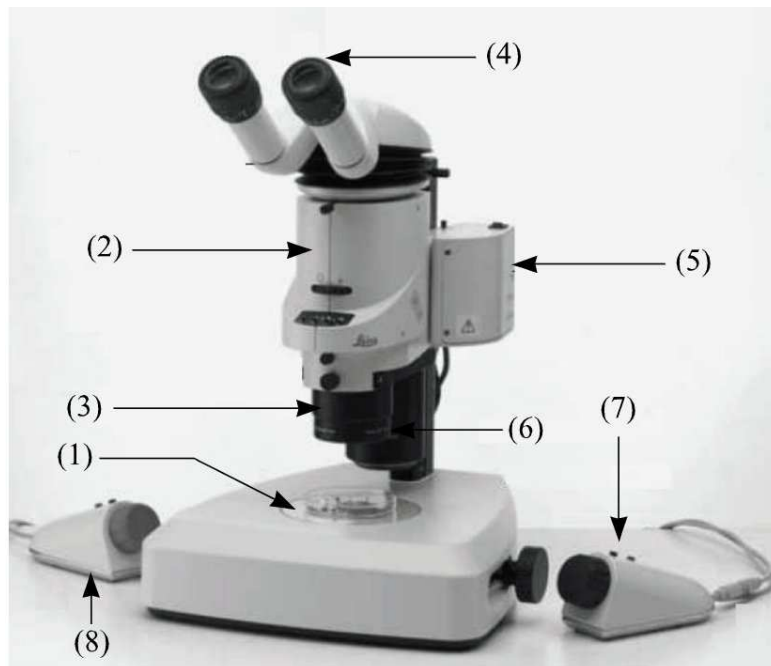


FIG. 3.3 – Le microscope optique MZ16A de marque Leica.

²Direct Linear Transform

Sur la figure [FIG. 3.3](#), est représenté le microscope optique qui équipe notre station de micro-assemblage. Il comprend :

- (1) le support (porte-échantillon) et un éclairage diascopique. Sur la station, ce support est remplacé par une table de positionnement à trois degrés de liberté et l'éclairage est remplacé par un autre, en forme de bague autour de l'objectif (éclairage épiscopique),
- (2) le tube,
- (3) l'objectif,
- (4) l'oculaire qui n'est pas utilisé et est donc remplacé par une caméra CCD pour une utilisation en mode vidéo microscope,
- (5) la motorisation du focus et du zoom,
- (6) l'emplacement de l'éclairage épiscopique,
- (7) la manette manuelle du commande du zoom,
- (8) la manette manuelle du commande du focus.

Sur le microscope Leica MZ16A, il existe deux chemins optiques ce qui fait de lui un stéréoscopique optique. Chacun de ces chemins optiques est incliné de 10° par rapport à l'axe vertical. Cependant, pour les applications visuelles présentées dans ce manuscrit, seul un chemin optique (celui de droite) est pris en considération, donc calibré. La méthodologie reste la même pour le deuxième chemin optique. Pour ce qui concerne le calibrage stéréoscopique faible, des travaux ont été déjà effectués et validés sur le même appareil par J. Bert et al. [\[BDLP07\]](#). Sur ce microscope, le champ de vision (CdV) varie de $700\ \mu\text{m} \times 900\ \mu\text{m}$ avec une résolution de $1.4\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ (grandissement max) jusqu'à $20\ \text{mm} \times 25\ \text{mm}$ avec une résolution de $21\ \mu\text{m}$ (grandissement min). La profondeur de champ (PdC) est estimée à $0.035\ \text{mm}$ à grandissement maximum et $2.9\ \text{mm}$ pour le grandissement minimum. Nous travaillons avec une taille d'image de 1024×772 pixels et une fréquence d'acquisition de l'ordre de 12 images/seconde.

3.3.1 Tour d'horizon des méthodes de calibrage de microscopes optiques

Comme il a été mentionné plus haut, en addition aux méthodes de calibrage avec des mires 3D composées de deux ou trois plans orthogonaux, d'autres méthodes basées sur l'utilisation d'une séquence d'images d'une mire 2D orientée sous différents angles sont présentées dans la littérature [\[Tsa87\]](#), [\[Zha99\]](#), [\[SM99\]](#). Ces méthodes, nécessitent, en général, une rotation minimale de la mire de 30° par rapport au plan rétinien, sans quoi, l'algorithme de calibrage subit des altérations (il diverge et perd en précision), [\[BF04\]](#). Dans ce qui suit, nous mentionnons quelques travaux que nous jugeons intéressants et qui traitent de la problématique du calibrage fort de microscope optique en utilisant une seule vue d'une mire planaire.

Aux USA, à l'Université de Minnesota, Y. Zhou et B. J. Nelson [\[ZN99\]](#) ont proposé une méthode basée sur l'approche de Tsai [\[Tsa87\]](#) modifiée pour prendre en compte le cas du calibrage utilisant un plan parallèle au plan rétinien. L'idée de cette approche est de simplifier le modèle de projection utilisé en approchant les angles de tangage (α) et

(β) lacet (autour des axes x et y) dans la matrice de rotation \mathbf{R} par de faibles angles. Il s'agissait de calibrer un microscope optique de type *Mitutoyo* FS60 équipé d'un capteur CCD de marque *Sony* XC-75. Leur méthode a été testée et validée sur deux objectifs, un $10\times$ et un $20\times$. Pour ce faire, une micromire plane a été conçue. Bien évidemment, la mire a été réalisée par des procédés de microlithographie. La mire comprend des trous carrés de dimension $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ gravés sur un wafer en silicium. Au total, la mire est composée de 7×7 trous carrés. Pour ce qui concerne la modélisation en elle-même, la matrice de paramètres \mathbf{K}_i proposée a pour forme :

$$\mathbf{K}_i = \begin{pmatrix} f_{ob} + f_{lt} & 0 & 0 \\ 0 & f_{ob} + f_{lt} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

avec f_{ob} et f_{lt} représentant, respectivement, la longueur de la focale de l'objectif et celle de la lentille du tube. Nous pouvons remarquer que, dès le départ, les pixels sont considérés comme étant parfaitement carrés. Dans la modélisation, Y. Zhou et B. J. Nelson [ZN99], ont introduit des paramètres de distorsions radiales du premier ordre de l'objectif. L'algorithme de calibrage présenté se déroule en deux étapes. Dans un premier temps les paramètres extrinsèques sont calculés par une méthode directe (closed-form), ensuite les paramètres calculés dans la phase 1 sont injectés dans le problème général pour en sortir les paramètres intrinsèques.

En France, à l'ENSI de Bourges, M. Ammi et al. [AFF05] ont proposé une méthode de calibrage destinée à des applications de réalité virtuelle pour immerger l'opérateur dans ce monde virtuel lors de la manipulation. L'approche proposée dans ces travaux est largement inspirée des travaux de Zhang [Zha99]. Cette méthode s'est inspirée du concept de la transformation homographique et nécessite plusieurs images de mire pour pouvoir effectuer le calibrage. Ammi et al. [AFF05] ont suggéré de modifier cette approche en utilisant qu'une seule vue de la mire et en réduisant le nombre de paramètres à déterminer. La mire utilisée consiste en une mire virtuelle obtenue par des mouvements précis d'une pointe AFM (FIG. 3.4). Le déroulement de l'algorithme de calibrage s'effectue en deux étapes, d'abord en calculant les paramètres intrinsèques et ensuite les paramètres extrinsèques.

Guadenz Danuser [DK95], [DV96], s'est longuement intéressé au calibrage d'un microscope photonique. Les approches avancées sont typiquement orientées vers le stéréo calibrage ou encore le calibrage en introduisant le facteur zoom dans les équations de modélisation. Il a introduit un nouveau modèle de projection stéréo microscopique. A cet effet, un nouveau terme dérivant de la distorsion non-paraxial du microscope optique est adjoint dans les paramètres intrinsèques. Peter Sturm a également travaillé sur le calibrage d'un microscope optique [Stu97]. Par contre, il s'est davantage intéressé aux méthodes d'auto-calibrage stéréoscopique d'un microscope équipé d'un zoom dynamique. La résolution du problème de détermination des paramètres intrinsèques est basée sur un pré-calibrage de l'imageur qui consiste à fixer dès le départ quelques paramètres comme

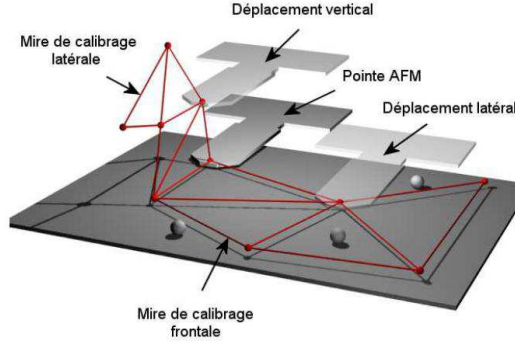


FIG. 3.4 – Mire virtuelle obtenue par des déplacements d’une pointe AFM, [AFF05].

le point principal (x_0, y_0) , le skew³ θ est le ratio des facteurs d’échelles suivant x et y ($s = k_x/k_y$). La matrice de paramètres intrinsèques considérée est donnée sous la forme suivante :

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \alpha_u(\alpha_v) & -\alpha_u(\alpha_v) \cot \theta & x_0(\alpha_v) \\ 0 & \alpha_v / \sin \theta & y_0(\alpha_v) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

avec $\alpha_u(\alpha_v) = s \frac{\alpha_v}{\sin \theta}$.

Après ce bref état de l’art dédié au calibrage de microscopes optiques dans le micro-monde, place à la description de l’approche que nous avons adoptée à la fois en termes de mire de calibrage utilisée et de méthodologie de calibrage proposée.

3.3.2 Choix de la mire de calibrage

Pour obtenir la meilleure précision possible au niveau de la détermination des paramètres et de la flexibilité de l’outil de calibrage développé, nous avons utilisé deux mires de calibrage à haute précision. La première est une mire réelle 2D qui consiste en un ensemble de trous carrés gravés sur un wafer en silicium. La deuxième micromire développée est également planaire, elle est par contre virtuelle. Les points qui la constituent sont obtenus directement à partir du suivi du centre de gravité $c_g = (x_g, y_g)$ d’un des microcomposants à manipuler. Regardons maintenant de plus près chacune de ces deux méthodes. Une méthode sera retenue à la fin et utilisée dans la suite de ce chapitre, en fonction de critères tels que la précision, la modularité et la flexibilité de la méthode.

Mire réelle 2D

À ce jour, de telles mires (micromires à haute précision) ne sont pas commercialisées. C’est pourquoi, la mire utilisée dans ce travail de thèse pour le calibrage a été pensée

³obliquité, du français

et conçue par nos soins pour des vidéo microscopes à fort grandissement. Un cahier des charges a été défini (FIG. 3.5) pour une meilleure précision, à la fois, sur la partie conception et la partie traitement d'image pour faciliter ainsi la tâche des algorithmes de détection des motifs de la mire.

Pour ce faire, des trous carrés de $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ (une mire avec des motifs de $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ a été pensée également pour d'autres microscopes à fort grandissement) ont été réalisés sur un wafer en silicium. Les trous sont, bien évidemment, non débouchant sur l'autre côté du wafer. En effet, nous souhaitons que les motifs aient une couleur (texture) la plus sombre possible. Afin de faciliter le traitement d'images, le contraste entre les motifs et les entre-motifs a été accentué à l'aide d'un dépôt d'une couche de dioxyde de silicium (SiO_2) sur le wafer. Enfin, pour ne pas abîmer la mire à chaque manipulation de cette dernière, une poignée fut également conçue sur le support de silicium (FIG. 3.6).

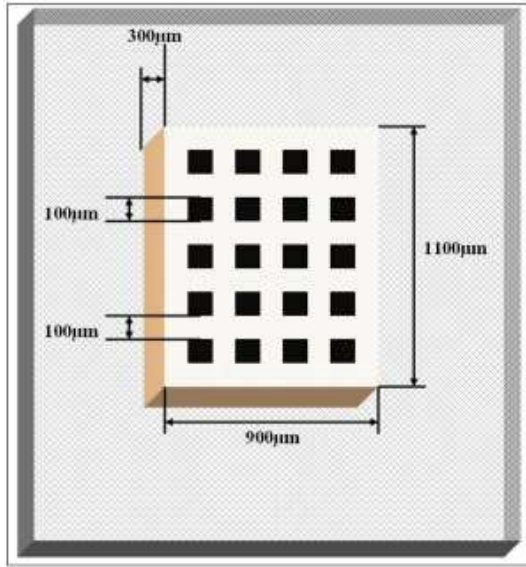


FIG. 3.5 – Cahier des charges pour la conception de la mire 2D.

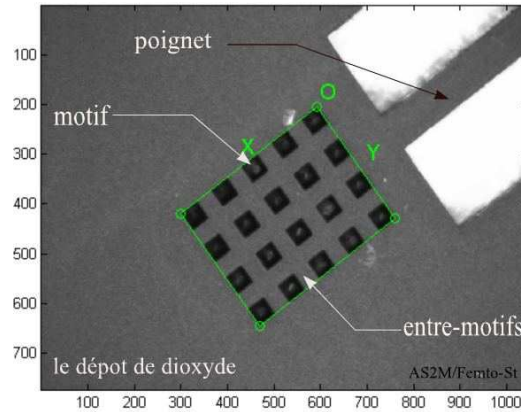


FIG. 3.6 – Photographie de la mire réelle en silicium.

Les points \mathbf{P}_w qui seront injectés dans le processus de calibrage correspondent aux quatre coins de chaque motif de la mire. Pour une meilleure précision, une détection sub-pixellique est exigée. À cet effet, nous avons utilisé une partie de la toolbox de calibrage développée par J.Y. Bouguet [Bou98]. Cette partie consiste à définir, de manière grossière, la position des coins de chaque motif. Ensuite, une recherche automatique affinée est effectuée sur une fenêtre de 5×5 pixels autour de la position définie préalablement, pour détecter plus précisément chacun des coins. La précision obtenue est très proche de 0.1 pixel (FIG. 3.7).

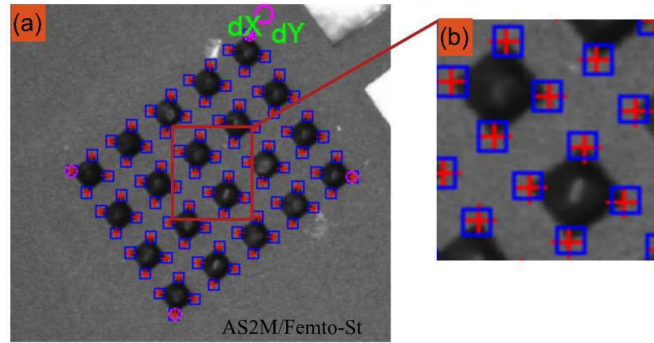


FIG. 3.7 – Détection des coins de chaque motif de la mire en silicium.

Nous ne nous sommes pas arrêtés à ce niveau là pour ce qui concerne la micromire à utiliser. Ainsi, une deuxième méthode de calibrage a été étudiée. Contrairement à celle présentée ci-dessus, la micromire en silicium a laissé place à une mire virtuelle 2D.

Mire virtuelle 2D

La deuxième micromire développée est une mire planaire et virtuelle obtenue à partir d'un ensemble de points détectés dans la scène. Ces points constituent la base de points \mathbf{P}_w . Pour ce faire, le même micro-objet en silicium de taille $400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, utilisé pour valider les approches développées de commande par asservissement visuel, est ici utilisé pour créer la micromire. Ce micro-objet est positionné sur la plateforme de positionnement (support de micro-objets) à 3 degrés de liberté x , y et θ . Les caractéristiques de ces trois axes sont portées sur le tableau TAB. 3.1.

les axes de translation	
résolution	$0.007 \mu\text{m}$
incrément	$0.05 \mu\text{m}$
vitesse max	1.5 mm/s
cOURSE	25 mm
l'axe de rotation	
résolution	$26 \mu\text{rad}$
incrément	$26 \mu\text{rad}$
vitesse max	45 deg/s

TAB. 3.1 – Spécificités des axes équipant la plateforme de positionnement.

Concernant la répétabilité des axes de translation, elle a été recalculée par nos soins afin de s'assurer de la précision de la mire obtenue. Cette répétabilité est de l'ordre de 100 nm suivant les deux directions x et y .

La construction de la mire se fait comme suit : dans un premier temps, le micro-objet est positionné à une position initiale (qui est considérée comme l'origine de la mire), ensuite des déplacements (d_x) sont appliqués suivant x et y pour construire un damier. À chaque déplacement, une image est acquise et traitée pour calculer le centre de gravité du micro-objet par un algorithme d'auto-corrélation normalisée (3.21).

$$C_{nor} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_1(i, j) \times I_2(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_1(i, j))^2 \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_2(i, j))^2}} \quad (3.21)$$

avec n et m respectivement la hauteur et la largeur de l'image, I_1 est l'image et I_2 est le modèle ⁴ représentant le micro-objet recherché dans l'image. Pour une précision sub-pixelique de la position des centres de gravité successifs du micro-objet tracké, une interpolation est faite, pour chaque ligne ou colonne du damier obtenu, par une droite de régression d_l .

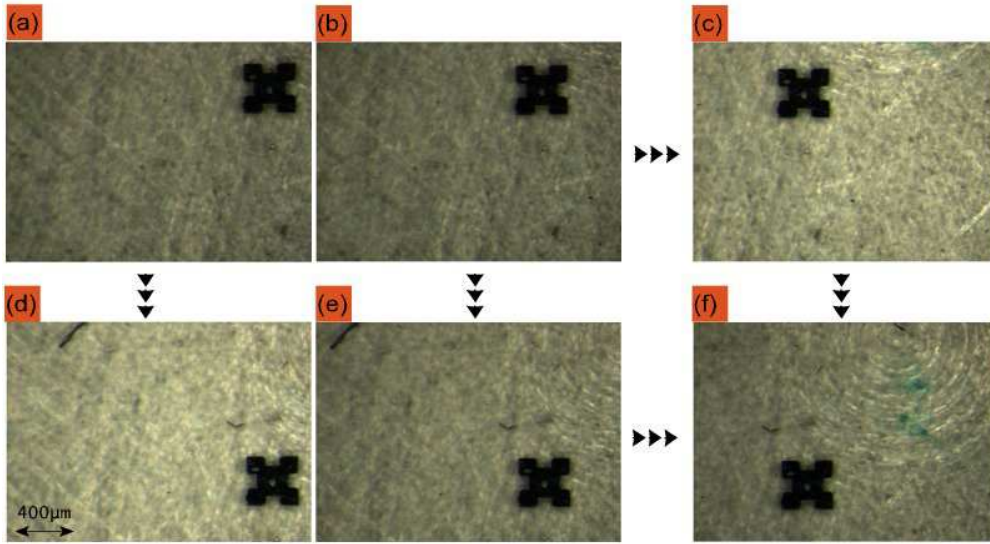
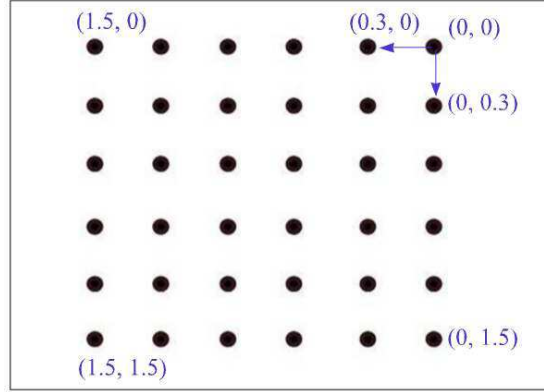


FIG. 3.8 – Construction de la mire virtuelle 2D.

L'imagette FIG. 3.8.(a) représente la position initiale de l'objet qui constitue l'origine de la mire virtuelle. L'imagette FIG. 3.8.(b) illustre la position du micro-objet après un déplacement de 300 μm sur x et l'imagette FIG. 3.8.(f) représente la position finale du micro-objet après la construction de la grille de la mire virtuelle.

Dans la section suivante, nous décrirons la méthodologie choisie pour effectuer un calibrage multi-échelle du vidéo microscope optique (présenté sur la figure FIG. 3.3).

⁴template

FIG. 3.9 – Ensemble des points \mathbf{P}_w obtenus (mire virtuelle 2D).

3.4 Modélisation multi-échelle

Le capteur CCD étant inchangé, la variation du zoom entraîne l'obtention de l'image d'une scène plus petite. Dans les paramètres du modèle simplifié, les coordonnées du point principal (x_0, y_0) restent inchangées, seul le produit facteur d'échelle par fréquence change.

Notons :

- ζ le facteur de zoom,
- (x, y) les coordonnées du point image dans le repère image \mathcal{R}_I .
- f_o est la longueur focale de l'objectif,
- l_t est la longueur du tube associé à l'objectif.

La matrice des paramètres intrinsèques $\mathbf{K}(\zeta)$ devient :

$$\mathbf{K}(\zeta) = \begin{pmatrix} f(\zeta)k_x & -k_x f(\zeta) \cos \theta & x_0 \\ 0 & f(\zeta)k_y / \sin \theta & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

où ζ est le facteur zoom et

$$f = f_o(\zeta) + l_t \quad (3.23)$$

Les facteurs d'échelle k_x et k_y sont donnés par les équations suivantes :

$$k_x = s_x \left(d_x \frac{N_{cx}}{N_{fx}} \right)^{-1} \quad (3.24)$$

et

$$k_y = 1/d_y \quad (3.25)$$

avec d_x et d_y les distances effectives entre chaque centre d'une cellule élémentaire du capteur CCD et son voisin ; N est le nombre de cellules élémentaires suivant la direction x ; N_{fx} est le nombre de pixels se trouvant sur une ligne d'échantillonnage sur la carte

d'acquisition et, enfin, s_x est le rapport d'échelle entre la surface du capteur CCD et la mémoire tampon de la carte d'acquisition [Tsa87]. Elle est donnée par :

$$s_x = \left(\frac{CCD_x}{CCD_y} \right) \left(\frac{N_{fx}}{N_{fy}} \right)^{-1} \quad (3.26)$$

De ces équations, il apparaît que l'utilisation de paramètres tels que k_u et k_v montre que lorsqu'on calibre une caméra, on s'intéresse à la modélisation de la caméra et du convertisseur analogique/digital [Tsa87], [RL88]. Cela dit, si on change l'un des deux, il faut à nouveau calibrer le système [Bey92].

Les avancées technologiques remarquables au niveau conception de capteurs CCD permettent la fabrication de capteurs d'image isotropes. Dans ce cas, les facteurs d'échelle (k_x et k_y) le long de x et y sont de plus en plus identiques. Ainsi, dans ce travail de calibrage, nous avons considéré comme égaux, les facteurs d'échelle suivant x et y . On écrit alors :

$$k_x = k_y = k \quad (3.27)$$

Les pixels sont très souvent de forme carrée, donc $\theta = 90^\circ$, ce qui permet d'écrire l'équation (3.22) sous la forme simplifiée suivante :

$$\mathbf{K}(\zeta) = \begin{pmatrix} f(\zeta)k & 0 & x_0 \\ 0 & f(\zeta)k & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

Pour cela l'équation (3.18) devient :

$$\begin{pmatrix} sx \\ sy \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k.f(\zeta) & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & k.f(\zeta) & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \mathbf{T}_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \mathbf{T}_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & \mathbf{T}_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

À présent, les équations de base de la modélisation générale d'un système de vision sont posées. Allons voir de plus près le calibrage d'un microscope optique et plus particulièrement du microscope Leica MZ16A qui équipe notre station de micro-assemblage.

3.4.1 Calcul des paramètres extrinsèques

Il faut noter que la qualité d'un microscope de laboratoire est généralement meilleure que celle d'un système de vision équipé d'objectif standard. Par exemple, les distorsions d'un microscope optique de type *Mitutoyo* expérimenté par Ammi et al. [AFF05] et Zhou et al. [ZN99] donnent, respectivement, les valeurs suivantes : $10^{-8} \mu\text{m}^{-2}$ et $10^{-10} \mu\text{m}^{-2}$. Nous simplifierons donc notre modèle en considérant que les distorsions sont nulles.

Le calibrage soit avec une mire réelle 2D, soit avec une mire virtuelle 2D implique que $Z_w = 0$, alors $\mathbf{P}_w = (X_w, Y_w, 0, 1)$ en introduisant la forme homogène. En développant l'équation (3.18), nous obtenons donc les deux équations suivantes :

$$x = [kf(\zeta)] \frac{r_{11}X_w + r_{12}Y_w + \mathbf{T}_x}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + \mathbf{T}_z} \quad (3.30)$$

$$y = [kf(\zeta)] \frac{r_{21}X_w + r_{22}Y_w + \mathbf{T}_y}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + \mathbf{T}_z} \quad (3.31)$$

En divisant l'équation (3.30) par l'équation (3.31), on obtient :

$$\frac{x}{y} = \frac{r_{11}X_w + r_{12}Y_w + \mathbf{T}_x}{r_{21}X_w + r_{22}Y_w + \mathbf{T}_y} \quad (3.32)$$

Le fait d'utiliser une mire plane, supposée parallèle au plan rétinien du microscope, nous permet de poser quelques contraintes. Une de ces contraintes est dite contrainte d'alignement radial [Tsa87]. Cela implique que le vecteur, qui s'étend de l'origine du plan rétinien à un point donné appartenant à ce plan, est radialement parallèle avec le vecteur qui s'étend de l'axe optique au point objet correspondant. La contrainte permet l'obtention directe des paramètres extrinsèques du microscope. Donc, de l'équation (3.32) en appliquant une multiplication croisée, nous pouvons déduire :

$$(r_{11}X_w + r_{12}Y_w + \mathbf{T}_x)y - (r_{21}X_w + r_{22}Y_w + \mathbf{T}_y)x = 0 \quad (3.33)$$

après développement, nous obtenons :

$$(yX_w)r_{11} + (yY_w)r_{12} + y\mathbf{T}_x - (xX_w)r_{21} - (xY_w)r_{22} - x\mathbf{T}_y = 0 \quad (3.34)$$

L'équation (3.34) possède 6 inconnues, à savoir, r_{11} , r_{12} , r_{21} , r_{22} , \mathbf{T}_x et \mathbf{T}_y . Pour remonter à ces inconnues, il faut au moins 6 correspondances entre le repère monde \mathcal{R}_w (points de la mire) et le repère rétinien \mathcal{R}_r (o , x , y) (équivalents des points de la mire dans l'image). Pour plus de mises en correspondance (> 6), les 6 paramètres peuvent être calculés par une procédure de minimisation par moindres carrés. Dans l'objectif de déterminer l'ensemble des paramètres de la matrice de rotation \mathbf{R} , nous utilisons la condition d'orthogonalité de la matrice de rotation énoncée ci-dessus et qui nous permet d'écrire :

$$r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2 = 1 \quad (3.35)$$

$$r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2 = 1 \quad (3.36)$$

$$r_{11}r_{21} + r_{12}r_{22} + r_{13}r_{23} = 0 \quad (3.37)$$

Les paramètres extrinsèques calculés jusqu'ici sont : \mathbf{T}_x , \mathbf{T}_y , α , β et γ , il manque alors un paramètre du vecteur de translation qui est \mathbf{T}_z . Ce paramètre sera calculé une fois les paramètres intrinsèques calculés.

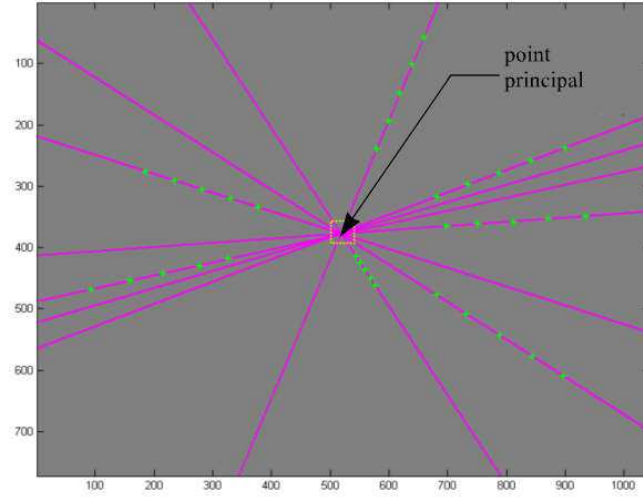


FIG. 3.10 – Estimation du point principal.

3.4.2 Calcul des paramètres intrinsèques

Nous avons jugé qu'il était intéressant de calculer certains paramètres intrinsèques par une méthode de pré-calibrage. Ainsi, les coordonnées du point principal P_p sont déterminées par l'approche suivante :

- **Estimation du point principal $P_p = (x_0, y_0)$** : le centre optique peut être défini comme étant le centre d'expansion du zoom du microscope optique. Son estimation se fait en analysant une séquence d'images en zoomant. Chaque point d'un même objet est suivi à travers la séquence et on estime la droite au sens des moindres carrés passant par chaque coordonnée de ce point (FIG. 3.10). Le calcul de l'intersection du faisceau de droites fournit le foyer d'expansion du zoom donc du point principal $P_p = (x_0, y_0)$.

- **Établissement de la relation entre f et ζ** :

En microscopie photonique équipée d'un zoom dynamique, la quantité $f = f_o + l_t$ change en fonction du zoom ζ comme dans notre cas, plus précisément c'est la longueur de la focale de l'objectif qui varie c'est-à-dire $f(\zeta) = f_o(\zeta) + l_t$. La relation qui relie les deux quantités, c'est-à-dire f à ζ , est donnée par :

$$\zeta = \frac{l_t}{f_o} \quad (3.38)$$

pour l_t connu, nous déduisons :

$$f_o = l_t / \zeta \quad (3.39)$$

Nous tentons d'établir une relation entre le changement du zoom et celui de la focale par la méthode suivante :

Sur le microscope Leica MZ16A, le grandissement varie entre $0.65 \times$ et $9.25 \times$, avec un pas de $0.001 \times$. Donc, sur cet intervalle il existe 8600 valeurs du grandissement. Afin d'éviter un travail conséquent prenant en compte toutes les valeurs, il nous est apparu plus judicieux d'établir une relation entre le grandissement ζ et la distance focale f . Cette partie de pré-calibrage repose sur l'utilisation d'une autre mire qui comporte trois trous (motifs) (FIG. 3.11). Ces derniers ont respectivement des diamètres de $1961.50 \mu\text{m}$, $1037.50 \mu\text{m}$ et $429.85 \mu\text{m}$. Le diamètre de chaque trou a été estimé à l'aide d'un MEB calibré et ayant une résolution $e = 10 \text{ nm}$ (FIG. 3.12). La présence des trous de diamètre différent s'explique par le souhait d'avoir une meilleure résolution au niveau des images, à la fois, pour le zoom minimum et le zoom maximum. Le déroulement de la procédure de pré-calibrage se déroule comme suit : une image est prise à chaque pas du zoom de $0.05 \times$ pour constituer une base de 172 images. Ensuite pour chaque image, un traitement est effectué pour détecter le cercle en utilisant la corrélation normalisée (3.21) et calculer son diamètre. Pour une précision sub-pixelique, une interpolation du contour du motif (trou), par un cercle, est faite à chaque fois.

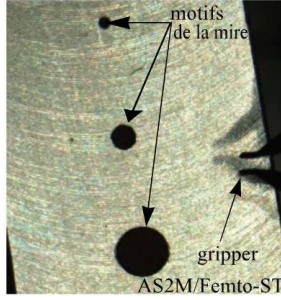


FIG. 3.11 – Photographie de la mire à trois trous.

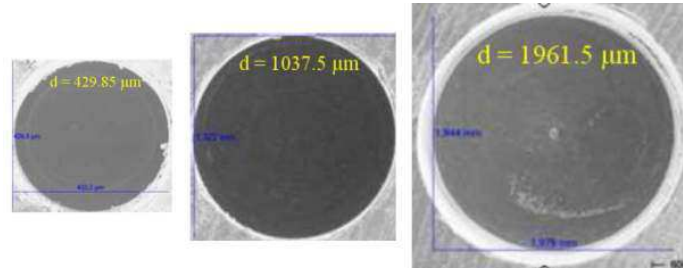


FIG. 3.12 – Mire pour établir la relation entre f et la valeur du zoom ζ .

Place maintenant à l'établissement de la relation de la distance focale en fonction de la variation du zoom. Ainsi, de la relation :

$$\zeta = \frac{l_t}{f_o} \quad (3.40)$$

on déduit :

$$f_o = \frac{l_t}{\zeta} \quad (3.41)$$

Afin d'établir la relation entre la longueur de la focale f et toutes les valeurs du grandissement ζ , nous avons interpolé les valeurs expérimentales par un polynôme P_l .

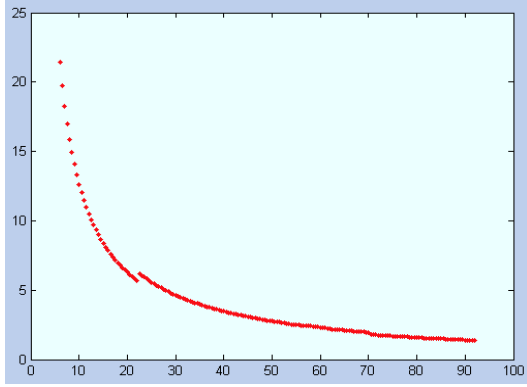


FIG. 3.13 – Courbe qui relie la quantité $k.f$ à ζ (courbe expérimentale).

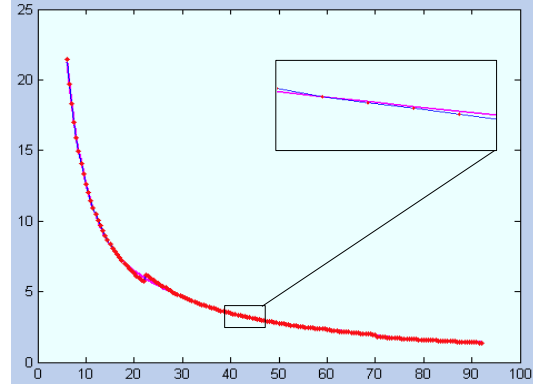


FIG. 3.14 – Courbe qui relie la quantité $k.f$ à ζ (courbe d'interpolation).

Le polynôme P_l a été obtenu en utilisant les fonctions de *Matlab* : *polyfit* et *polyval*. Cette relation est donnée par la formule suivante :

$$f = \frac{l_t}{a_i \begin{pmatrix} \zeta^{10} & \zeta^9 & \cdots & 1 \end{pmatrix}^T} \quad (3.42)$$

où :

$$a_i = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_{11} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Les valeurs numériques des a_i conduisent au vecteur suivant :

$$a_i = \begin{bmatrix} 7.71 \times 10^{-16} \\ -4.01 \times 10^{-13} \\ 9.15 \times 10^{-11} \\ -1.20 \times 10^{-8} \\ 1.01 \times 10^{-6} \\ -5.76 \times 10^{-5} \\ 2.23 \times 10^{-3} \\ -5.86 \times 10^{-2} \\ 1.00 \times 10^0 \\ -1.05 \times 10^1 \\ 5.82 \times 10^1 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

La figure FIG. 3.13 illustre la relation obtenue entre le grandissement ζ et la distance focale f (à un facteur près k) à partir des valeurs expérimentales. La figure FIG. 3.14 représente l'interpolation des valeurs expérimentales pour avoir une relation complète entre toutes les valeurs du grandissement possibles sur le microscope dont nous disposons, c'est-à-dire 8600 valeurs. Une remarque peut être tirée de ces résultats : la relation entre le grandissement et la longueur de la focale n'est pas une relation linéaire.

Parmi les paramètres extrinsèques, il reste un paramètre à déterminer, à savoir, la composante \mathbf{T}_z du vecteur de translation \mathbf{T} . Ce paramètre peut être calculé en utilisant la relation (3.45) qui relie la distance focale f_o et le grandissement ζ à \mathbf{T}_z . Alors, pour une distance focale f_o correspondant à une position du zoom ζ , \mathbf{T}_z est accessible par la relation suivante :

$$\mathbf{T}_z = f_o \cdot \frac{\zeta + 1}{\zeta} \quad (3.45)$$

Désormais, il reste à définir la distance de travail d . Ce paramètre représente la distance entre le repère objet (mire) et l'objectif du microscope (voir figure FIG. 3.15). La relation (3.47) donne le paramètre d . Maintenant que f_o et \mathbf{T}_z sont connus, d est aisément accessible par :

$$\mathbf{T}_z \approx f_o + d \quad (3.46)$$

$$d \approx \mathbf{T}_z - f_o \quad (3.47)$$

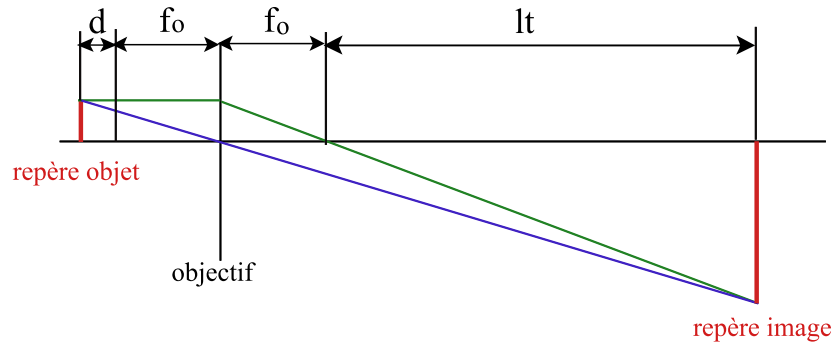


FIG. 3.15 – Microscope optique

3.4.3 Résultats du calibrage

À une position donnée du zoom (38) affichée sur le cadran numérique du microscope optique Leica MZ16A, ce qui correspond à un grandissement de $3.8\times$, la modélisation du microscope (paramètres intrinsèques et extrinsèques) est résumée dans le tableau TAB. 3.2.

Finalement, la matrice des paramètres extrinsèques \mathbf{D} vaut :

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0.0196 & 0.9966 & 0.0801 & 882 \\ 0.8887 & -0.0541 & 0.4554 & 963 \\ 0.4581 & 0.0622 & -0.8867 & 13156 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

paramètres intrinsèques	paramètres extrinsèques
$k_x = 3.6444 \mu\text{m}^{-1}$	$\alpha = 88.73^\circ$
$k_y = 3.6444 \mu\text{m}^{-1}$	$\beta = -27.26^\circ$
$f = 11.466 \times 10^3 \mu\text{m}$	$\gamma = 4.01^\circ$
$(x_o, y_o) = (473, 337) \text{ (pixel)}$	$\mathbf{T}_x = 8.82 \text{ (cm)}$
$d = 13.144 \text{ (cm)}$	$\mathbf{T}_y = 9.63 \text{ (cm)}$
$M = 3.8\times$	$\mathbf{T}_z = 13.156 \text{ (cm)}$

TAB. 3.2 – Résultats du calibrage pour une position du zoom à 38 (grandissement $\zeta = 3.8\times$).

et la matrice des paramètres intrinsèques K vaut :

$$\mathbf{K}_{\{3.8\}} = \begin{pmatrix} 3146.3 & 0 & 473 \\ 0 & 3146.3 & 337 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ (pixels).}$$

3.4.4 Analyse des résultats

Pour l'analyse des résultats, nous avons utilisé une méthode d'analyse d'erreur classique, à savoir l'erreur moyenne (E_{moy}). Cette erreur moyenne s'exprime suivant la relation (3.48).

$$E_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(\hat{X}_i - X_i)^2 + (\hat{Y}_i - Y_i)^2 + (\hat{Z}_i - Z_i)^2}}{N} \quad (3.48)$$

avec N représentant le nombre total de points $\mathbf{P}_i(X_i, Y_i, Z_i)$ utilisés correspondant aux points de la mire (virtuelle ou réelle). Les points $\hat{P}_i(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i)$ sont les coordonnées des points calculés de la mire après reprojection en utilisant les résultats de la modélisation obtenus. i est l'indice correspondant à chaque point. L'erreur moyenne obtenue pour l'ensemble des paramètres intrinsèques et extrinsèques en utilisant la mire réelle, avoisine la valeur de $E_{moy-reelle} = 3.1446 \mu\text{m}$. Dans le même temps cette erreur moyenne, obtenue cette fois-ci en utilisant la mire virtuelle, est de l'ordre de $E_{moy-virtuelle} = 1.4553 \mu\text{m}$. Par simple comparaison des résultats, il s'avère que le calibrage avec la mire virtuelle est deux fois plus précis que celui avec la mire réelle en silicium. Cependant, est-ce que cette simple comparaison nous suffit pour décider d'utiliser la mire virtuelle au détriment de la mire réelle. Pour ce faire, nous tentons d'argumenter notre choix en pesant le pour et le contre de chaque méthode dans la section ci-dessous.

3.4.5 Quelle mire choisir pour le calibrage ?

Afin de comparer les deux méthodes de calibrage (avec mire réelle ou mire virtuelle), nous avons mis en place deux critères : facilité de mise en œuvre de la méthode et pré-

cision de celle-ci. Contrairement au calibrage dans le macromonde, les paramètres de calibrage dans le micromonde sont très sensibles à beaucoup de paramètres extérieurs comme la température, l'humidité, les vibrations, ...etc. Un recalibrage du système de vision (une fois par semaine) est vivement conseillé. Pour ce qui concerne l'utilisation de la mire réelle, son utilisation pose quelques problèmes, comme, par exemple l'intervention de l'opérateur humain dans l'espace de travail qui est vivement déconseillée. Cela pour différentes raisons, à savoir : l'espace de manipulation est un espace très confiné (difficilement accessible), sensé resté propre (les interventions peuvent conduire au dépôt de poussières de même taille, voire, plus grandes que les micro-objets à manipuler). De plus, la précision attendue d'un calibrage avec la mire réelle est relativement contrainte par la qualité de la mire du point de vue de l'usinage. L'obtention d'une grande précision de gravure des motifs sur le wafer n'est jamais garantie. Et enfin, la précision de la détection des motifs, même par les techniques de traitement d'images les plus avancées, dépend fortement de la qualité de l'image acquise de la mire. Plus le grandissement du microscope optique est important, moins l'image est contrastée, ce qui augmente la difficulté à détecter les motifs de manière robuste et précise. Cela reste également vrai lorsque la mire n'est pas parfaitement posée à plat (inclinée de seulement quelques degrés) sur la plateforme de positionnement, ce qui implique un *floutage* de certains motifs de la mire à cause de la faible profondeur de champ.

En conséquence de ce qui a été étudié ci-dessus, notre choix s'est porté sur l'utilisation de la méthode de calibrage en utilisant une mire virtuelle 2D. Cette méthode est plus précise et plus flexible pour opérer des calibrages périodiques de notre système de vision. Trois raisons démontrent cette flexibilité :

- n'importe quel micro-objet se trouvant sur la support de positionnement peut être suivi pour construire la mire,
- la distance entre un point et son voisin peut être choisie entre $1\ \mu$ et quelques centaines de micromètres en fonction de la position du zoom,
- le nombre de points $\mathbf{P}_w(\mathbf{X}_w, \mathbf{Y}_w, 0)$ à injecter dans le processus de calibrage peut être également choisi en fonction de nos besoins.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans un premier temps la méthodologie et les étapes à suivre pour calibrer (modéliser) un capteur de vision de manière générale. Nous avons mis l'accent sur la différence entre le calibrage d'une caméra conventionnelle et celui d'un microscope photonique. Nous avons montré l'incompatibilité de transférer directement les méthodes de calibrage du macromonde vers le micromonde. Cela pour deux raisons : l'impossibilité d'utiliser des mires ou motifs 3D pour le calibrage de systèmes de vision à fort grandissement à cause de leur faible profondeur de champ, et l'existence d'une légère différence au niveau des paramètres intrinsèques des deux

familles d'imageurs. Dans ce chapitre, une section a été dédiée à la présentation du microscope optique qui équipe notre station de micro-assemblage, en l'occurrence le microscope Leica MZ16A. La particularité de cet imageur réside dans le fait qu'il dispose d'un zoom dynamique et commandable par ordinateur. À cet effet, un calibrage multi-échelle s'impose. Pour ce faire, nous avons proposé une nouvelle matrice de paramètres intrinsèques $\mathbf{K}(\zeta)$ en introduisant le facteur zoom ζ . La modélisation a été validée d'un côté, à l'aide d'une mire réelle plane en silicium (des motifs carrés ont été gravés sur un wafer en silicium) et d'un autre côté, en utilisant une mire virtuelle 2D obtenue par le tracking d'un micro-objet posé sur la plateforme de positionnement. En comparant chacune des méthodes, que ce soit au niveau précision, modularité ou flexibilité, il s'est avéré que la mire virtuelle est mieux adaptée à nos besoins. Les résultats obtenus dans ce chapitre seront utilisés, par la suite dans les chapitres dédiés à la micromanipulation et au micro-assemblage par asservissement visuel de différents micro-objets (micro-objets en silicium, microfibres optiques, microbilles en métal, ...).

Autofocus, depth-from-focus et shape-from-focus

*Ce chapitre regroupe les différentes méthodes développées et qui sont liées au calcul du focus dans une image microscopique. Ces techniques s'appellent autofocus, depth-from-focus et shape-from-focus. Dans un premier temps, nous présentons des techniques d'estimation du focus dans une image ainsi que leurs implémentations sur la station de micro-assemblage SAMMI. Ensuite, nous aborderons la technique d'estimation de la profondeur de la scène (depth-from-focus) développée. Ces deux premiers outils sont utilisés pour mettre en œuvre une méthode de tracking de la pince par le microscope lors des tâches de micromanipulation ou de micro-assemblage. Enfin, une technique de reconstruction 3D a été mise au point afin de procéder à la reconstruction 3D de micro-objets ou d'organes terminaux du système de préhension. Cette dernière méthode trouve une application dans l'alignement des doigts de la pince avant chaque cycle de manipulation ou d'assemblage. Elle permet de s'assurer du bon déroulement de la tâche de saisie.*¹.

¹Ce travail a été réalisé en collaboration avec Guillaume Fortier, actuellement Ingénieur Expert au sein de l'équipe Lagadic à INRIA Rennes-Bretagne Atlantique et Benoît Ballarin actuellement Ingénieur de Recherche à l'Institut Pierre Vernier à Besançon.

Sommaire

4.1	Introduction	74
4.2	Autofocus	75
4.2.1	Algorithmes basés sur le calcul des dérivées	76
4.2.2	Algorithmes basés sur le calcul d'histogramme	76
4.2.3	Algorithmes intuitifs	77
4.2.4	Algorithmes basés sur les statistiques	77
4.3	Implémentation de l'autofocus sur nos stations de micro-assemblage	78
4.4	Depth-from-focus	80
4.5	Tracking en temps réel de la pince par le microscope optique	81
4.6	Shape-from-focus	82
4.6.1	Sélection des points nets dans l'image	83
4.6.2	Filtrage gaussien	87
4.6.3	Filtrage basé sur l'analyse en composantes principales	89
4.6.4	Reconstruction 3D des doigts de la micro-pince	91
4.6.5	Estimation de l'orientation spatiale des doigts de la pince	92
4.7	Conclusion	95

4.1 Introduction

Il est encore une fois question dans ce manuscrit de la vision microscopique. Toujours dans l'objectif de mieux utiliser le microscope photonique, des travaux ont été menés et sont présentés à travers ce chapitre. Ces travaux sont essentiellement fondés sur l'utilisation d'une des contraintes de la microscopie photonique non pas comme un inconvénient mais plutôt comme un avantage. Cette caractéristique majeure est bien évidemment la faible profondeur de champ (*PdC*). Malgré la puissance de l'œil humain, il est très difficile de faire une mise au point sur un microscope optique en utilisant seulement notre *jugement* sur la netteté ou non d'une image. Ainsi, il est plus judicieux d'utiliser des techniques algorithmiques pour remplacer l'opérateur humain. Cela s'inscrit également dans notre souhait d'automatiser complètement nos stations de micro-assemblage. Ces algorithmes s'appellent techniques d'auto-focalisation ². Par exemple, pour un meilleur déroulement d'une tâche d'assemblage, il est essentiel que la prise du micro-objet soit parfaitement maîtrisée. Cela revient à dire qu'il ne faut pas qu'il y ait une torsion du micro-objet lors de son serrage par les doigts du gripper. En effet, les points de contact entre les doigts de la pince et l'objet doivent être parallèles pour éviter toute flexion ou torsion. Ces points de contact peuvent être des points (lors de la manipulation des microbilles), des segments de droites ou des plans (pour les objets planaires), comme illustré sur la figure [FIG. 4.1](#). Par conséquent, il est plus que nécessaire de bien aligner

²autofocusing, de l'anglais

les organes terminaux de la micropince avant chaque série de micromanipulations ou de micro-assemblages. Nous présentons notre approche basée sur les techniques de depth-from-focus³ et shape-from-focus⁴ pour estimer la pose des doigts de la micropince à travers la reconstruction 3D de ces derniers. Un autre problème est traité concernant la perte de netteté sur le micro-objet durant les tâches d'orientation ou de positionnement spatial. La solution proposée est de réaliser un suivi du système de grippage, après la saisie du micro-objet, par le microscope optique. Ce suivi permet de garder le micro-objet dans le plan focal du microscope durant les tâches de micromanipulation ou de micro-assemblage.

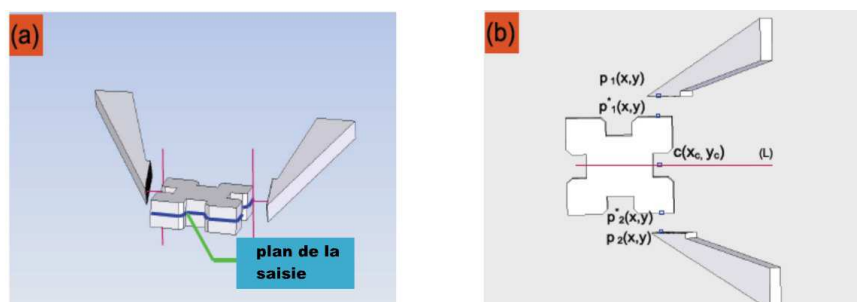


FIG. 4.1 – Illustration d'une saisie parfaite d'un micro-objet planaire avec un gripper incliné à 45° .

4.2 Autofocus

Définition.4.1.1 : le terme autofocus est utilisé par la communauté anglo-saxonne mais largement repris par les francophones et désigne la mise au point automatique d'un système de vision. Un algorithme d'autofocus est généralement basé sur l'estimation d'un critère de netteté dans l'image à une position (z) dans la scène. Donc à chaque position z , une image est acquise, traitée et elle se voit attribuer une valeur de netteté (ou degré de netteté). Une fois la scène entièrement scannée, le système de vision se positionnera de manière automatique à la position z_h qui correspond à la plus forte valeur de netteté (v_n) obtenue lors du scan.

Une large variété d'algorithmes d'estimation du focus, dans une image, a été présentée dans la littérature [FIG85], [LKK⁺91], [MTA93], [ACJ⁺97]. Les techniques d'estimation du focus dans une image peuvent être classées en quatre catégories : les algorithmes basés sur le calcul des dérivées, les algorithmes basés sur le calcul d'histogramme, les algorithmes intuitifs et les algorithmes basés sur les statistiques.

³profondeur à partir du focus

⁴forme à partir du focus

4.2.1 Algorithmes basés sur le calcul des dérivées

Ces techniques sont basées sur le calcul de la norme du gradient entre un pixel et ses voisins. Si la norme du gradient est importante, c'est qu'il existe un fort contraste entre le pixel et ses voisins. Une image est jugée nette par rapport aux autres quant elle accumule la plus forte somme des normes du gradient pour chaque pixel de l'image. Cependant, cette technique est très sensible vis-à-vis du bruit à haute fréquence. Parmi ces algorithmes, nous pouvons citer :

- L'algorithme de Santos et al. [ACJ⁺97] (*Thresholding Absolute Gradient*) qui s'exprime par la relation suivante :

$$Th_{abs} = \sum_{ln} \sum_{lr} |i(x+1, y) - i(x, y)| \quad (4.1)$$

où $i(x, y)$ l'intensité du pixel ayant pour coordonnées (x, y) ; lr la largeur de l'image et ln sa longueur et $|i(x+1, y) - i(x, y)| > \delta$.

- L'algorithme de Brenner et al. [BJB⁺71] (*Brenner Gradient*) :

$$F_B = \sum_{Lr} \sum_{ln} (i(x+2, y) - i(x, y))^2 \quad (4.2)$$

où $(i(x+2, y) - i(x, y))^2 > \delta$

- L'algorithme de Nayar et al. [SY94] (*Sum of Modified Laplace*) :

$$F_{smL} = \sum_{ln} \sum_{lr} |L_x(x, y)| + |L_y(x, y)| \quad (4.3)$$

où $|L_x(x, y)|$ est la valeur absolue de la convolution de l'image avec un opérateur Laplacien L suivant x , de même pour $|L_y(x, y)|$ suivant y .

- L'algorithme des ondelettes de Haar est donné par la relation suivante :

$$F_{wHaar} = \sum_{lr} \sum_{ln} |W_{lrln}(x, y)| + |W_{lnlr}(x, y)| + |W_{lrlr}(x, y)| \quad (4.4)$$

avec W_{lrln} , W_{lnlr} , W_{lrlr} représentant des sous-régions de l'image appelées également ondelettes.

4.2.2 Algorithmes basés sur le calcul d'histogramme

Cette famille d'algorithmes utilise l'estimation de l'histogramme de l'image $h(i)$ (compter le nombre de pixels dans l'image ayant pour intensité i). L'image est jugée nette en analysant donc la distribution et la fréquence des intensités de l'image à travers l'histogramme $h(i)$. Parmi les travaux liés à cette méthode, on peut citer :

- Les méthodes proposées par Firestone et al. [LKK⁺91] (*Range Algorithm*) et (*Entropy Algorithm*) définies, respectivement, par les relations suivantes :

$$F_{rg} = \max_i (h(i) > 0) - \min_i (h(i) > 0) \quad (4.5)$$

et

$$F_{entropy} = \sum_i p_i \log_2(p_i) \quad (4.6)$$

où i représente les intensités des pixels de l'image.

4.2.3 Algorithmes intuitifs

Parmi les techniques intuitives de calcul du focus référencées dans la littérature, nous pouvons citer :

- Les algorithmes de Groen et al. [FIG85] (*Thresholded Content*) et (*Thresholded Pixel Count*), exprimés respectivement par les relations suivantes :

$$F_{th-cont} = \sum_{lr} \sum_{ln} i(x, y) \quad (4.7)$$

et

$$F_{pixel-cont} = \sum_{lr} \sum_{ln} s(i(x, y), \delta) \quad (4.8)$$

avec $s(i(x, y), \delta) = \begin{cases} 1 & \text{si } i(x, y) \leq \delta \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$.

- Nous pouvons citer également l'algorithme de Santos et al. [ACJ⁺97] (*Image Power*) :

$$F_{pow} = \sum_{lr} \sum_{ln} i(x, y)^2 \quad (4.9)$$

4.2.4 Algorithmes basés sur les statistiques

Ces algorithmes dits statistiques reposent sur le calcul de critères comme la variance ou la corrélation. Par exemple, plus la variance est élevée entre un pixel et ses voisins plus le contraste est important, ce qui explique une certaine netteté de l'image. Ces méthodes sont souvent plus robustes vis-à-vis du bruit par rapport aux méthodes basées sur le calcul de la dérivée. Parmi les méthodes référencées dans la littérature, on trouve :

- L'algorithme de Yeo et al. [TSR93] (*Variance Method or Normalized Variance Method*). Les expressions de la variance et de la variance normalisée sont données, respectivement, par les relations suivantes :

$$F_{var} = \frac{1}{lr \cdot ln} \sum_{lr} \sum_{ln} (i(x, y) - \mu)^2 \quad (4.10)$$

et

$$F_{\text{var-norm}} = \frac{1}{l_r \cdot l_n \cdot \mu} \sum_{l_r} \sum_{l_n} (i(x, y) - \mu)^2 \quad (4.11)$$

avec μ la moyenne sur l'intensité de l'image.

- L'algorithme de Vollath [Vol88] (*Auto-Correlation Method*) donné par l'équation ci-dessus :

$$F_{\text{corr}} = \sum_{l_r} \sum_{l_n} i(x, y) i(x + 1, y) - \sum_{l_r} \sum_{l_n} i(x, y) i(x + 2, y) \quad (4.12)$$

4.3 Implémentation de l'autofocus sur nos stations de micro-assemblage

Nous avons choisi de tester et d'implémenter quatre méthodes triées parmi celles citées ci-dessus. Ces quatre techniques de focus sont : la variance normalisée (4.11), l'auto-corrélation (4.12), les ondelettes de Haar (4.4) et l'algorithme de Brenner (4.2). Les méthodes ont été testées et validées sur deux stations de micro-assemblage, d'un côté la station **PRONOMIA**, (FIG. 4.2), équipée d'un microscope optique inversé à très fort grandissement et d'un autre côté sur le microscope photonique à moyen grandissement qui équipe la station **SAMMI** (FIG. 3.3).

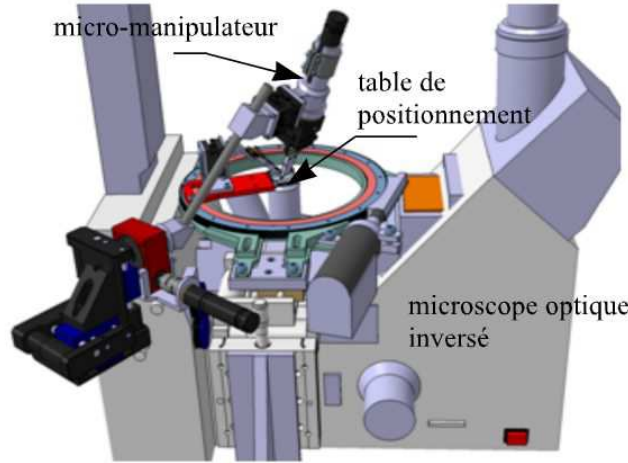


FIG. 4.2 – Modèle CAO (Conception assistée par ordinateur) de la station de micro-assemblage PRONOMIA.

L'exécution de l'autofocus s'effectue comme suit : à chaque déplacement de l'ensemble *objectif + tube* du microscope d'un pas *dist* suivant l'axe optique de ce dernier, une image est acquise. Sur l'image prise, une des méthodes citées ci-dessus est appliquée. La valeur du focus obtenue est enregistrée dans un vecteur $V_f(1 \times 2)$ qui contient également la position z_i à laquelle l'image i est acquise. Une fois que le scan est terminé, les

valeurs du focus F sont représentées sur une courbe en fonction de la position z (voir figure FIG. 4.3).

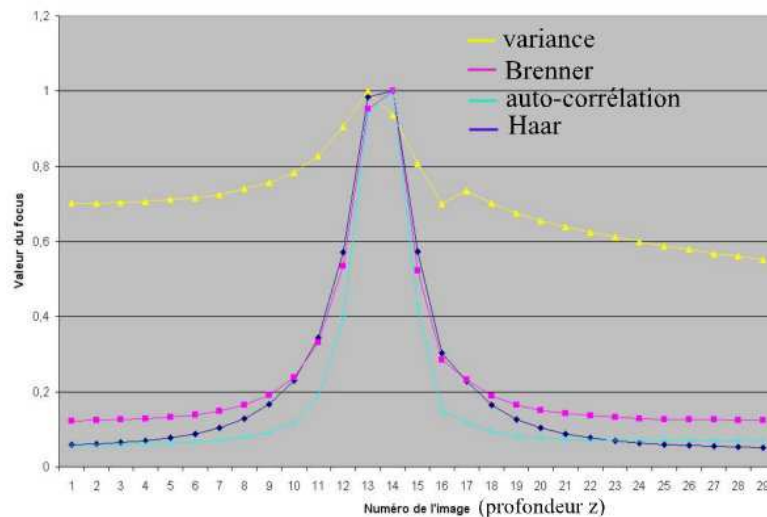


FIG. 4.3 – Courbe représentant les différentes méthodes d'estimation du focus.

La figure FIG. 4.3 représente l'évolution des différents focus, obtenus avec les quatre méthodes choisies, en fonction de la position z . Les résultats mentionnés sur cette courbe sont obtenus sur la station PRONOMIA avec le microscope optique inversé illustré sur la figure FIG. 4.2.

La détermination de la position du microscope pour avoir l'image la plus nette de la scène observée, revient à déterminer la valeur de z qui correspond au maximum de la courbe de la figure FIG. 4.3. Une fois que $z_{image-nette}$ est déterminé, il suffit de régler le microscope à cette position de manière automatique. Cependant, la précision de cette position est directement liée à la résolution du pas du scan $dist$, plus ce dernier est affiné plus la précision est importante.

La séquence d'images illustrée sur la figure FIG. 4.4 a été prise sur la station de micro-assemblage SAMMI avec le microscope Leica MZ16A présenté dans le chapitre précédent. La figure FIG. 4.4.(b) représente l'image nette qui correspond à la position de la mise au point automatique du microscope optique. Les figures FIG. 4.4.(a) et FIG. 4.4.(c) sont respectivement deux images prises, aléatoirement dans l'ensemble des images du scan, avant et après l'image nette. Le pas du scan choisi sur cette séquence est de $10\ \mu\text{m}$.

Voyons de plus près les courbes du focus obtenues cette fois-ci sur la station SAMMI et tentons également de les interpréter.

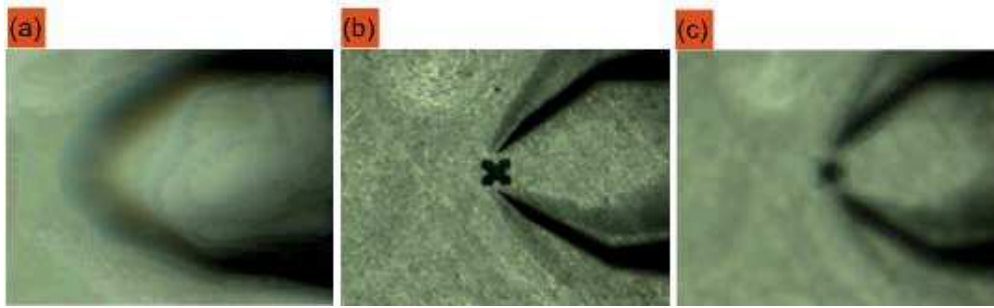


FIG. 4.4 – Illustration du fonctionnement de l'autofocus sur la station SAMMI.

4.4 Depth-from-focus

Sur la station de micro-assemblage SAMMI, et ceci peut être valable sur la quasi-totalité de ce type de stations, les tâches de micromanipulation se font en deux temps. Dans un premier temps, le micro-objet est positionné à une position désirée (tâche assurée par la plateforme de positionnement) et dans un deuxième temps, ce micro-objet est saisi (tâche assurée par un gripper porté par un manipulateur). Le positionnement est souvent de type planaire ($xy\theta$) et la saisie fait intervenir des déplacements suivant l'axe z (profondeur) ou d'autres mouvements dans l'espace. Ceci est quasiment impossible à réaliser à cause de la faible profondeur de champ du microscope contrairement à un capteur de vision conventionnel. Pour contourner cette contrainte liée à la vision microscopique, nous avons proposé une nouvelle approche. Cette dernière permet, par exemple, de déterminer la profondeur totale de la scène z , de déterminer la distance entre le microscope et l'objet (distance de travail d) ou encore de déterminer la distance entre le microscope et le système de préhension. Pour ce faire, nous avons interprété la courbe du focus obtenue lors du scan de la scène suivant l'axe optique du microscope optique.

Parmi les quatre méthodes testées sur la station PRONOMIA, nous en avons choisi deux qui nous semblent les plus adaptées à nos applications. En effet, en fonction de la qualité de la scène observée (qui dépend du type d'éclairage employé, du matériau visualisé, du rapport signal/bruit,...) les performances de telle ou telle méthode peuvent changer radicalement en fonction de ces critères. Pour la station SAMMI, nous avons opté pour la méthode de la variance normalisée et celle du gradient de Brenner. Les résultats obtenus sur une séquence d'images avec un pas de scan de $5 \mu\text{m}$ sont portés sur la figure FIG. 4.5.

Nous utiliserons les notations suivantes : d pour la distance de travail, z_{o-g} pour la distance entre le micro-objet et le gripper et z_{g-m} la distance entre le gripper et le microscope photonique. Ces valeurs sont liées par la relation suivante :

$$d = z_{o-g} + z_{g-m} \quad (4.13)$$

Dans la figure FIG. 4.5, nous distinguons parfaitement deux pics sur la courbe. Le pic le plus important est celui correspondant au focus sur la table de positionnement,

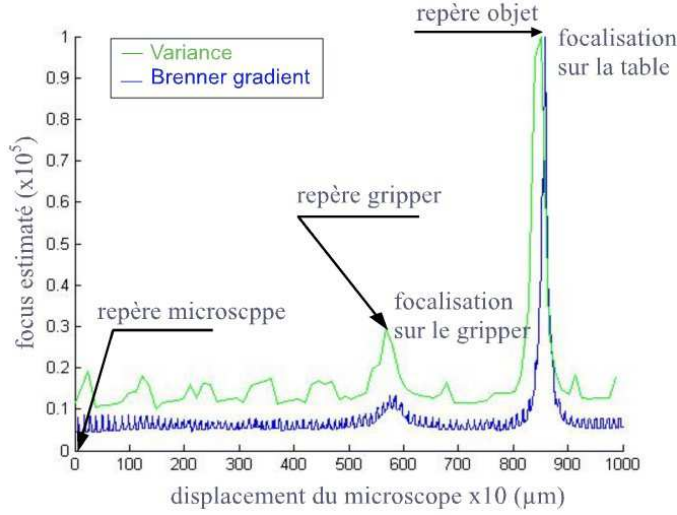


FIG. 4.5 – Illustration de courbe de focus obtenue.

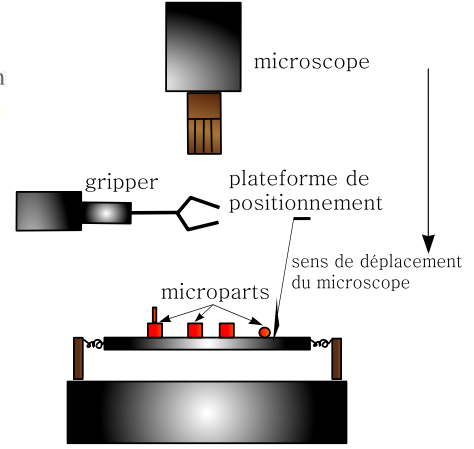


FIG. 4.6 – Représentation de la position des éléments (caméra, micropince et porte-échantillon) sur la station SAMMI.

donc des micro-objets posés dessus. Le deuxième pic est celui de la focalisation sur le système de gripping. Ainsi, de l'équation (4.13), nous pouvons déduire la distance ($z_{o-g} = d - z_{g-m}$) entre le gripper et la table de positionnement (porte-échantillons) et donc du micro-objet. Cette distance est injectée dans la loi de commande par asservissement visuel 2D, qui sera présentée dans le chapitre suivant. Toujours dans la figure FIG. 4.5, nous constatons que les deux courbes (variance normalisée et gradient de Brenner) sont entachées de petits pics (bruit). Avant de détecter le premier maximum et le deuxième maximum, il faut procéder à un lissage de la courbe. Pour ce faire, nous avons implémenté une méthode de lissage basée sur celle intégrée dans la toolbox [Curve Fitting Techniques] de Matlab. Le principe est largement inspiré du traditionnel filtre moyennneur.

4.5 Tracking en temps réel de la pince par le microscope optique

Des questions se posent sur ce que devient la focalisation lorsque la manipulation ou l'assemblage est entamé et sur la nécessité de refaire l'autofocus à chaque déplacement spatial. C'est pour répondre à ces interrogations que nous avons développé une application de suivi de la pince par le microscope. Son fonctionnement est le suivant, tout d'abord, un autofocus est effectué pour se focaliser sur la plateforme mobile ; de ce fait, les quantités d , z_{o-g} , z_{g-m} sont accessibles ; ensuite une commande par asservissement visuel est exécutée pour positionner le micro-objet entre les doigts de la pince pour permettre sa saisie ; ensuite le micro-objet est saisi et à partir de ce moment, le microscope

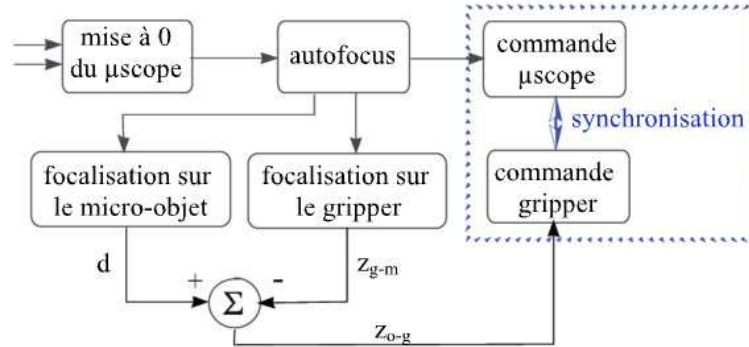


FIG. 4.7 – Boucle de commande assurant le suivi du système de gripping par le microscope optique.

suit la micropince s'il y a mouvement de cette dernière. L'intérêt du suivi du gripper à partir de ce moment là, est le suivi en même temps du micro-objet saisi. Ainsi, la focalisation sur le micro-objet à assembler ou à manipuler est permanente.

La figure FIG. 4.7 montre la boucle de commande utilisée pour l'autofocus et le suivi de la micropince par le microscope optique lors des tâches de micro-assemblage.

La figure FIG. 4.8.(a) représente l'étape initiale de la séquence, c'est-à-dire une focalisation automatique, à la fois, sur la table de positionnement et sur le gripper. Ensuite le microscope suit tous les mouvements du gripper pour rester à tout moment focalisé sur les doigts de la pince (FIG. 4.8.(b), (c) et (d)).

Cette fonction de tracking est directement intégrée dans le logiciel dédié au pilotage du microscope optique Leica MZ16A, initialement développé par Benoît Ballarin. La figure FIG. 4.9 illustre de manière globale ce logiciel de pilotage du microscope avec les parties autofocus et tracking du gripper par le microscope.

Nous avons également utilisé les méthodes d'autofocus présentées ci-dessus pour faire de la reconstruction tridimensionnelle de micro-objets. Ce sont ces travaux que nous allons présenter dans la suite de ce chapitre.

4.6 Shape-from-focus

Basée sur le principe de l'autofocus qui recherche une valeur maximale du focus de manière globale à l'image, le shape-from-focus permet d'obtenir une reconstruction 3D d'un objet, à partir d'une série d'images, en recherchant une valeur maximale du focus mais de manière locale. Cette méthode combine la petite profondeur de champ du système optique avec l'acquisition de séries d'images à différentes distances focales.

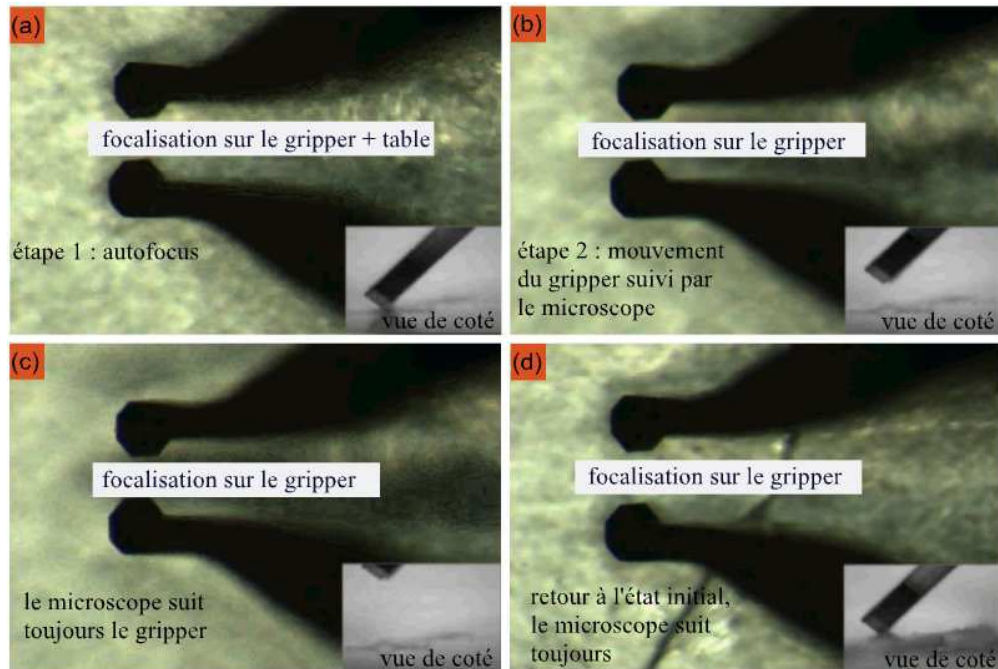


FIG. 4.8 – Séquence d'images qui montre un mouvement du gripper en forme de "U" inversé. La focalisation est toujours maintenue sur le gripper.

Cette méthode a été utilisée pour permettre la reconstruction 3D des doigts d'une micropince et la détermination de leurs orientations spatiales. Cette approche est complétée par des techniques de filtrage. La première méthode s'inspire des méthodes de filtrage gaussien et la deuxième méthode utilise, quant à elle, une approche basée sur des méthodes statistiques (analyse en composantes principales). Les termes qui désignent les approches de reconstruction 3D de micro-objets en utilisant l'information focus sont : depth-from-focus, depth-from-defocus ou encore shape-from-focus [Nay89], [NNS03], [ZH03], [Wed04], [HMD06], [FTDFP08]...

L'algorithme [1] montre la structuration de l'approche que nous proposons pour remonter à la forme 3D des organes terminaux de la micropince qui équipe la station de micro-assemblage "PRONOMIA". Cet algorithme a été appliqué à une séquence d'images prises par le microscope optique inversé avec un grandissement $\Gamma = 40\times$.

4.6.1 Sélection des points nets dans l'image

Dans cette section, il sera question du fonctionnement de l'algorithme shape-from-focus [1] développé et présenté dans ce manuscrit.

- **Masque binaire** : la définition du masque binaire marque la première étape de la reconstruction 3D. En fait, les doigts de la micropince ne représentent environ qu'un cin-

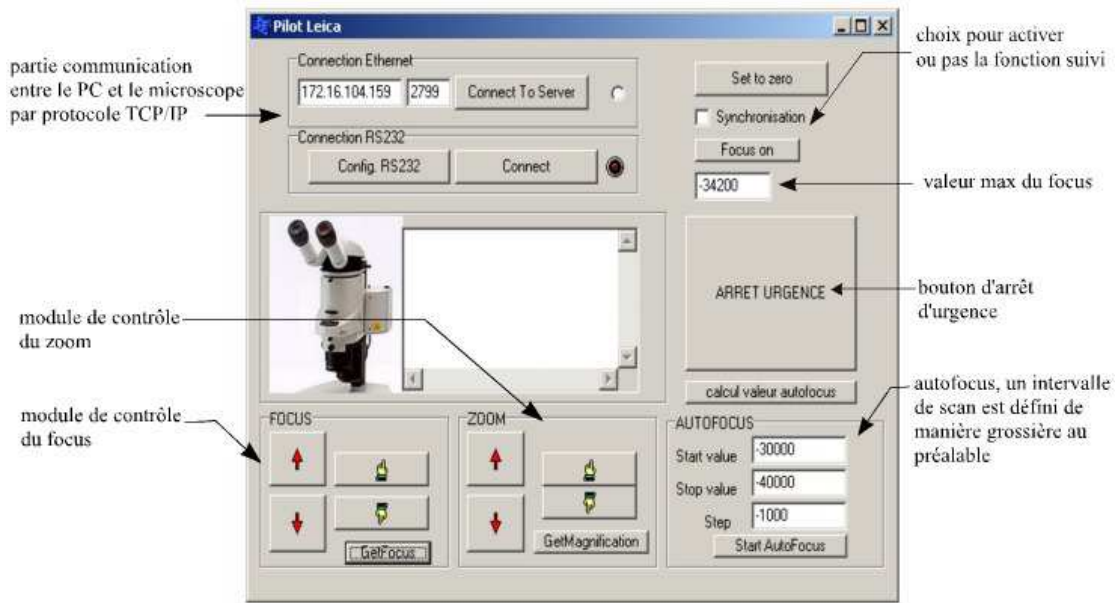


FIG. 4.9 – Logiciel de pilotage du microscope photonique de la station SAMMI.

quième de l'image de la scène. Ainsi, nous définissons un masque binaire qui délimite, de manière très approximative, la partie dans l'image où se trouvent les doigts (FIG. 4.10.(a)). Ceci permet de gagner considérablement en temps de traitement, en plus cela évite de reconstruire des parties de l'image qui ne nous intéressent aucunement. Le masque est donc généré de manière automatique par seuillage de chaque image avec un seuil commun préalablement défini. Pour éliminer les fausses détections sur les bords de l'objet, provoquées par la faible profondeur de champ, le résultat de chacun des seuillages respectifs de chaque image ont été mis en commun pour définir le masque final.

La figure FIG. 4.10 montre quelques images d'une séquence de scan. Les parties focalisées des doigts de la micropince sont facilement distinguables, du moins à l'œil nu.

Une fois le masque défini, la seconde étape consiste à calculer pour chaque pixel de l'objet appartenant au masque binaire et dans chaque image son degré de netteté (FIG. 4.11). Ce degré est évalué par calcul de la variance donnée par l'équation (4.14). La variance est utilisée comme suit : pour chaque pixel (i, j) de chaque image N de la séquence, la variance locale à ce pixel dans le voisinage $n \times n$ vaut :

$$V_{(x,y)}(N) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=x-k}^{x+k} \sum_{j=y-k}^{y+k} (I_{(i,j)} - \overline{I_{(x,y)}})^2 \quad (4.14)$$

où :

- $V(x, y)(N)$: valeur de la variance du pixel (x, y) de l'image N , avec $N = \{0, 1, \dots, \text{nombre d'images}\}$

Algorithm 1: Algorithme de reconstruction 3D des doigts d'une micropince.

```

début
  - positionnement du microscope à la position relative "0"
  - définir le pas du scan de la scène
  - définir la taille du masque de la variance
  - définir le masque binaire
  pour tous les  $l = 1 : NImages$  faire
    pour tous les  $i = 1 : hauteur\ de\ l'image$  faire
      pour tous les  $j = 1 : largeur\ de\ l'image$  faire
        pour tous les  $k = 1 : taille\ du\ masque\ de\ la\ variance$  faire
          - calculer la variance  $var(i,j)$  de chaque pixel  $(i,j)$  sur  $k$ 
            pixels-voisins
          - calculer le maximum de  $var(i,j)$  pour le même pixel  $(i,j)$  sur
            l'ensemble des  $N$  images
          - déterminer le pixel ou les pixels nets de chaque image  $l$ 
        fin
      fin
    pour tous les  $m = 1 : Nb\ pixels\ détectés$  faire
      - filtrage basé sur la méthode du filtrage gaussien
      - filtrage basé sur la méthode statistique d'analyse en composantes
        principales
      si pixel  $(i,j)$  gardé après filtrage alors
        - ajouter à la reconstruction 3D
      sinon
        - rejeter le point
      fin
    - reconstruction 3D
  fin

```

- n : taille du masque de la variance
- k : dépend de la taille du voisinage, égale $(n - 1)/2$
- $I(i, j)$: valeur en niveau de gris du pixel (i, j)
- $\bar{I}(x, y)$: moyenne des niveaux de gris dans le voisinage $n \times n$ du pixel (x, y)

Comme il a été mentionné ci-dessus, la méthode de shape-from-focus repose sur l'utilisation de l'information focus de manière locale. Cela veut dire qu'au lieu de comparer un pixel à ses voisins dans la même image, il est plutôt comparé aux pixels des autres images se trouvant sur la même position x et y (FIG. 4.11). Dans ce cas, nous obtenons la courbe représentée sur la figure FIG. 4.12. Le pic de la courbe correspond au pixel qui reçoit le degré de netteté le plus élevé sur l'ensemble des images de la séquence et cela pour la même position en x et y . Malheureusement lors de l'expérimentation, la courbe de la variance obtenue ne correspond pas vraiment à ce qui est représenté sur la figure FIG. 4.12. La courbe est fortement entachée de bruit à cause de fausses détections et de mauvaises estimations. En effet, la détection des pixels à fort degré de netteté n'est

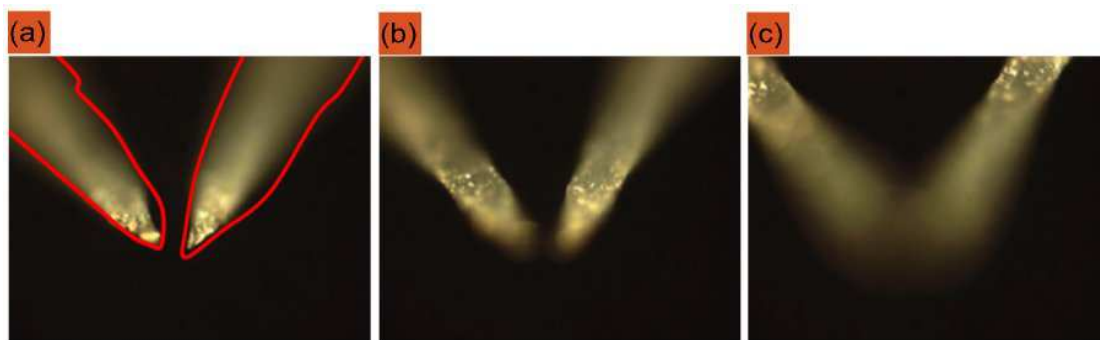


FIG. 4.10 – Séquence montrant le déplacement de zone de netteté sur les doigts de la pince pendant le scan.

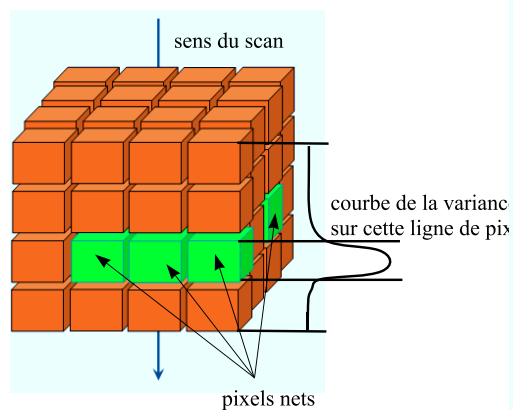


FIG. 4.11 – Illustration du choix de la netteté du même pixel sur l'ensemble des images.

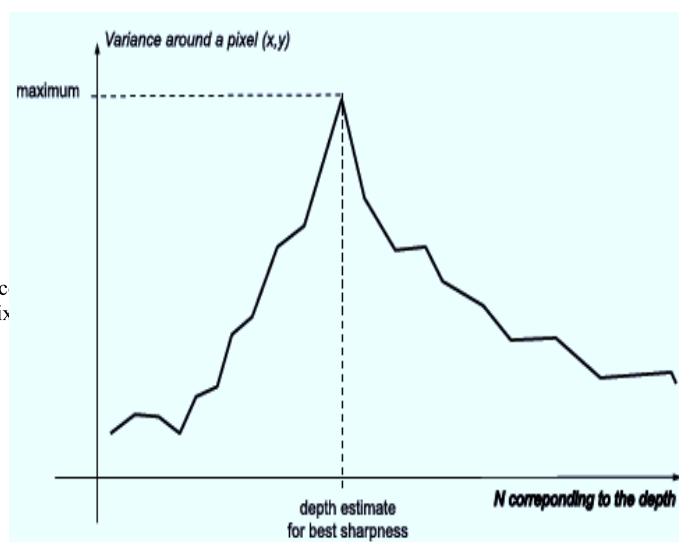


FIG. 4.12 – Représentation de la variance du même pixel sur une séquence d'images.

pas si évidente que cela. Pour ce faire, nous avons proposé deux méthodes de filtrage pour améliorer la robustesse de la détermination des pixels nets.

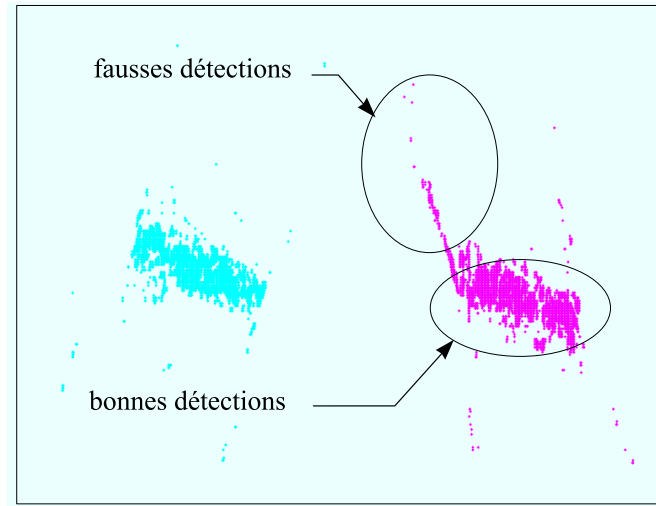


FIG. 4.13 – Pixels à fort degré de netteté sur une image de la séquence.

La figure FIG. 4.13 montre un exemple de détection de points à fort degré de netteté sur une image choisie de la séquence d'images considérée. On distingue assez facilement deux ensembles de points (pixels) qui correspondent parfaitement à la zone nette de l'image, donc à des petites parties des doigts de la micropince. Dans le même temps, nous remarquons la présence d'autres pixels dans le reste de l'image. Ces pixels sont détectés comme étant des pixels à fort degré de netteté alors qu'en réalité ils ne le sont pas. Le prochain challenge est alors de trouver des solutions qui permettent de séparer les vrais pixels à fort degré de netteté des fausses détections. Pour ce faire, nous nous sommes posés la question suivante : d'où viennent autant de fausses détections ? La réponse est dans le choix du critère de sélection des pixels nets sur la courbe de la variance représentée sur la figure FIG. 4.12. Car, dans la réalité, la courbe est loin d'être parfaitement définie. La figure FIG. 4.14 montre la réalité des choses, une courbe de la variance fortement bruitée. Cela dit, nous remarquons que la courbe montre une distribution de la forme d'une gaussienne. Ainsi, la première méthode développée permettant de filtrer une bonne partie des pixels faussement détectés, est basée sur un filtre de type gaussien.

4.6.2 Filtrage gaussien

- **Lissage de la courbe** : la première étape consiste à améliorer l'allure de la courbe. En effet, nous cherchons à avoir une allure de type gaussienne. La relation implémentée est très proche du filtre moyenneur (4.18). Cette relation est appliquée sur une des courbes de la variance et le résultat est porté sur la figure FIG. 4.14. La courbe obtenue (illustrée en bleu sur la figure) a parfaitement une forme de gaussienne sans le bruitage de la courbe originale.

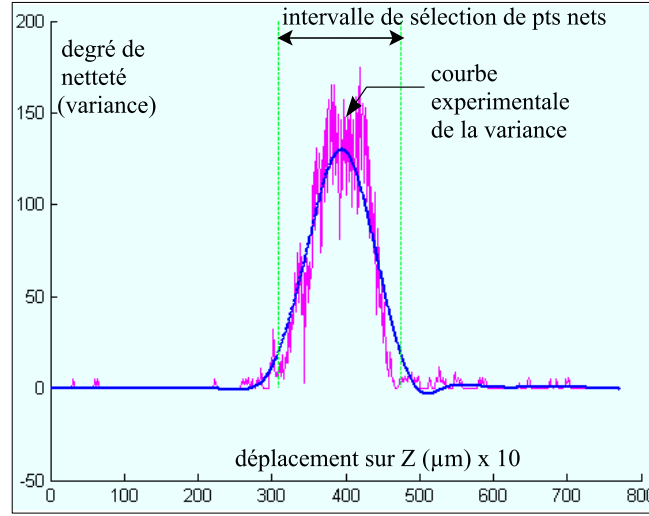


FIG. 4.14 – Allure de la courbe de la variance obtenue expérimentalement.

$$s(1) = y(1) \quad (4.15)$$

$$s(2) = (y(1) + y(2) + y(3))/3 \quad (4.16)$$

$$s(3) = (y(1) + y(2) + y(3) + y(4) + y(5))/5 \quad (4.17)$$

$$s(4) = (y(2) + y(3) + y(4) + y(5) + y(6))/5 \dots \quad (4.18)$$

avec $y(1), y(2), \dots, y(t)$ les valeurs expérimentales de la variance et $s(t)$ représente les valeurs de la variance après filtrage.

De nouvelles valeurs de la variance sont calculées ainsi que la valeur maximale max , la moyenne de la distribution moy et également l'écart type σ . À partir de là, le filtre gaussien peut être mis au point. Les valeurs dites à fort degré de netteté, sélectionnées par le filtre gaussien, sont comprises dans l'intervalle donnée par :

$$ind(max) \pm \delta \cdot \sigma \quad (4.19)$$

où δ est un paramètre de réglage agissant sur le filtre (l'intervalle de sélection).

Un des intérêts du filtre gaussien est le réglage très facile du degré du filtrage à travers le paramètre σ .

La figure FIG. 4.15 illustre la succession des deux étapes c'est-à-dire lissage et filtrage gaussien. Trois exemples de variance fortement bruitée sont illustrés. Regardons, à présent, de plus près ce que le filtrage apporte à la méthode de sélection des pixels dits à fort degré de netteté sur une série d'images (voir figure FIG. 4.16).

Une bonne partie du travail de filtrage et de sélection des pixels nets qui rentreront dans la reconstruction 3D des organes terminaux de la micropince, est maintenant réali-

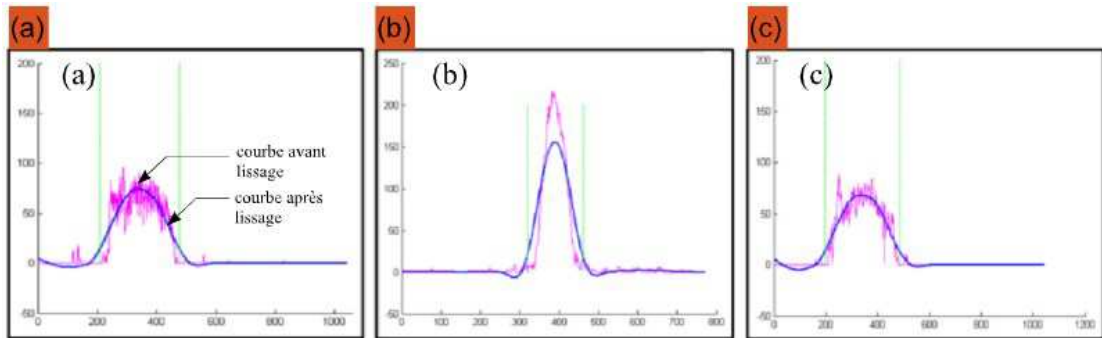


FIG. 4.15 – Quelques résultats des deux étapes (lissage et filtrage) des courbes expérimentales de la variance sur certains pixels de l'image.

sée. Malgré cela, il reste toujours de fausses détections. La partie suivante de ce chapitre est donc consacrée à une réflexion sur une autre méthode de filtrage qui viendra seconder la première méthode. Des résultats meilleurs sont attendus.

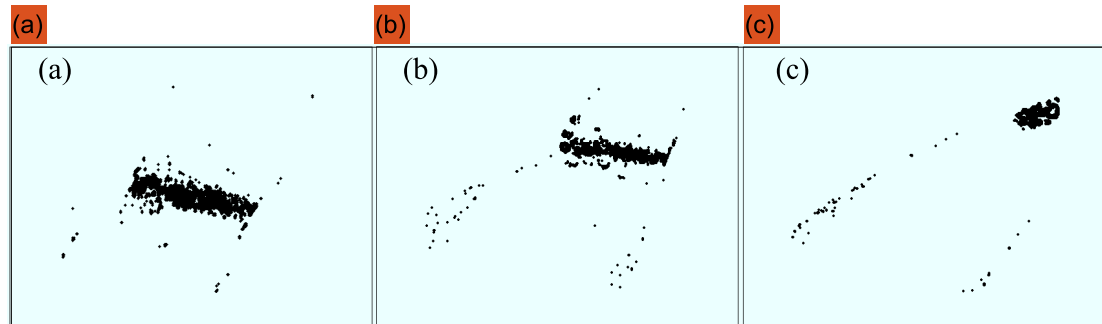


FIG. 4.16 – Pixels à fort degré de netteté sélectionnés après un filtrage gaussien.

4.6.3 Filtrage basé sur l'analyse en composantes principales

Cette deuxième méthode de filtrage est inspirée de la méthode mathématique d'analyse de données connue sous le nom de l'analyse en composantes principales (ACP). L'ACP consiste à rechercher les directions de l'espace qui représentent le mieux les corrélations entre n variables aléatoires. Dans notre cas, cette distribution n'est rien d'autre que les pixels à fort degré de netteté. Dans le domaine des statistiques, cette méthode est usuelle pour caractériser, par exemple, les effets conjoints via le coefficient dit de corrélation, d'une distribution de points. Donc, une représentation plus simple et plus facile à interpréter est possible du fait que les données complexes du départ peuvent être représentées suivant les axes principaux de la distribution primaire. De plus, cette méthode permet de *débruiter* les données initiales. En effet, la connaissance des axes

principaux de la distribution nous permet de choisir les points représentés sur ces axes et d'oublier ceux qui sont sur les axes secondaires.

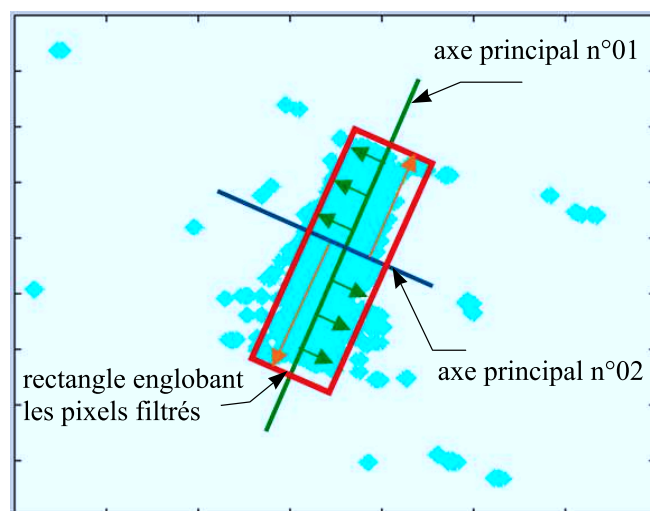


FIG. 4.17 – Illustration des axes principaux de la distribution des pixels détectés.

La figure FIG. 4.17 présente une illustration des deux axes principaux sur une distribution de pixels à fort degré de netteté. Nous cherchons plus tard à filtrer les *outliers* ⁵ suivant ces axes principaux. Seront donc ignorés, les pixels qui ne rentrent pas dans le rectangle englobant illustré en couleur rouge sur la figure FIG. 4.17.

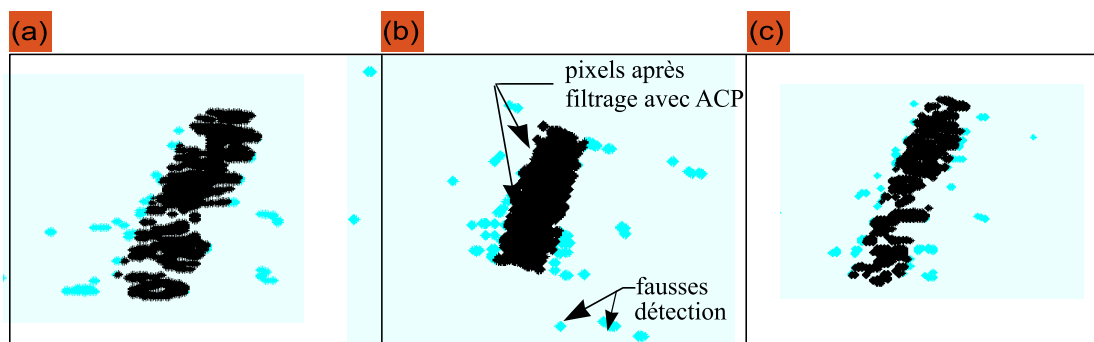


FIG. 4.18 – Représentation des pixels jugés nets par les deux méthodes de filtrage.

Sur la figure FIG. 4.18, nous remarquons que les sections nettes des doigts de la micropince sont parfaitement délimitées par l'association des deux méthodes de filtrage présentées ci-dessus. En couleur noir, les pixels jugés par les deux approches comme étant des pixels nets dans l'image. Une remarque peut être tirée de la représentation des résultats du deuxième filtre c'est que le rectangle englobant les pixels nets épouse

⁵les pixels marginaux

parfaitement la forme de la section des doigts de la micropince focalisée par le microscope photonique.

4.6.4 Reconstruction 3D des doigts de la micro-pince

Une fois les pixels à fort degré de netteté détectés avec un minimum de bruit possible, et ceci sur l'ensemble des images dans la séquence, place à présent à l'étape de reconstruction 3D. Pour ce faire, l'ensemble des pixels nets détectés sur chacune des images sont concaténés suivant l'axe z (axe du scan). La concaténation est espacée, bien évidemment, par une distance correspondante au pas du scan *dist* choisi préalablement. Il est bon à savoir que plus le pas *dist* est petit plus la reconstruction 3D est proche de la forme réelle du sujet étudié. La visualisation de la reconstruction 3D se fait, soit à travers le logiciel *Matlab*, soit sous *OpenGL*.

- **Visualisation sous *Matlab*** : comme il a été cité ci-dessus, les points jugés enfin nets sont concaténés suivant l'axe du scan. Ces points sont ensuite reliés entre eux (maillage des points) pour donner une allure 3D aux doigts de la pince. La partie du script *Matlab* qui permet d'afficher la reconstruction 3D est la suivante :

```
%-----
0001 figure;
0002 hold on;
0003 % reconstruction du doigt #01
0004 tri = delaunay(netPts1(:,1), netPts1(:,2));
0005 trisurf(tri, netPts1(:,1), netPts1(:,2), netPts(:,3));
0006 % reconstruction du doigt #02
0007 tri = delaunay(netPts2(:,1), netPts2(:,2));
0008 trisurf(tri, netPts2(:,1), netPts2(:,2), netPts2(:,3));
%-----
```

La représentation 3D des doigts de la micropince illustrée sur la figure **FIG. 4.19** a été obtenue avec un pas de scan *dist* = 10 μm et un masque de la variance de taille 5×5 pixels.

Les techniques et algorithmes présentés dans ce chapitre ont été testés et validés sur d'autres formes, et notamment sur les micro-objets dont on cherche à faire l'assemblage. La reconstruction 3D, du moins d'une partie d'un micro-objet en silicium de taille $400 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ est représentée sur la figure **FIG. 4.21**. Contrairement, à la première validation sur les doigts de la pince, dans cet exemple la visualisation est faite sous *OpenGL*. Nous remarquons que la représentation de l'objet est donnée sous forme d'un nuage de points sans triangulation entre eux.

Il faut rappeler que l'un des objectifs de ces travaux sur le shape-from-focus est de pouvoir accéder à la position 3D des organes terminaux de la micropince dans l'espace. Cette information nous permettra de contrôler l'alignement des doigts au début de

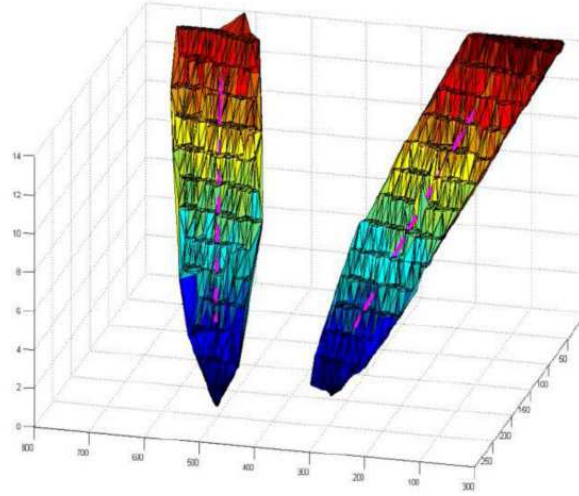


FIG. 4.19 – Reconstruction 3D des doigts de la micropince, visualisation "*Matlab*".

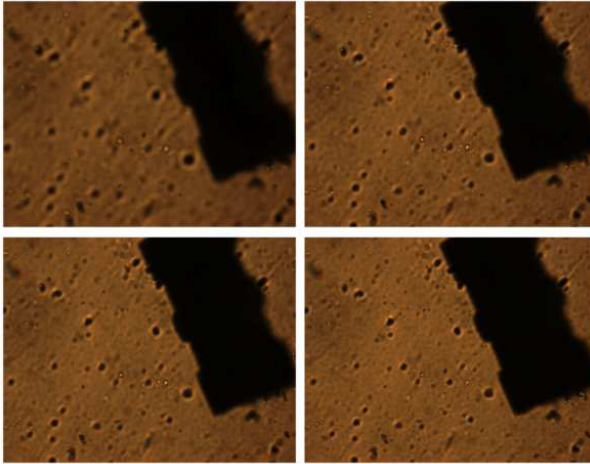


FIG. 4.20 – Séquence d'images d'un micro-objet vue par un microscope optique inversé ($40\times$).

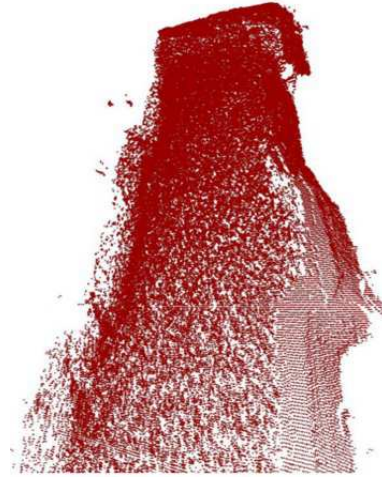


FIG. 4.21 – Zoom sur une partie du micro-objet reconstruit.

chaque cycle de micromanipulation ou de micro-assemblage. C'est dans cette idée que s'inscrit la suite de ce chapitre.

4.6.5 Estimation de l'orientation spatiale des doigts de la pince

À partir des nuages de points détectés nets sur chacune des images de la séquence, il est possible d'estimer un barycentre $b = (x_b, y_b)$ de ces pixels nets. Les coordonnées de ce dernier sont accessibles par la relation suivante :

$$x_b = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (4.20)$$

$$y_b = \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{N} \quad (4.21)$$

$$z_b = z_0 + i.dist \quad (4.22)$$

avec N le nombre de pixels jugés nets dans l'image i , x_i et y_i leurs coordonnées et z_0 la position du commencement du scan.

Une fois que le barycentre de chaque section nette est calculé, une régression linéaire 3D est implémentée pour approximer l'ensemble des barycentres par une droite (D) dans l'espace. La régression est réalisée par la méthode des moindres carrés. Le résultat est porté sur la figure FIG. 4.22.

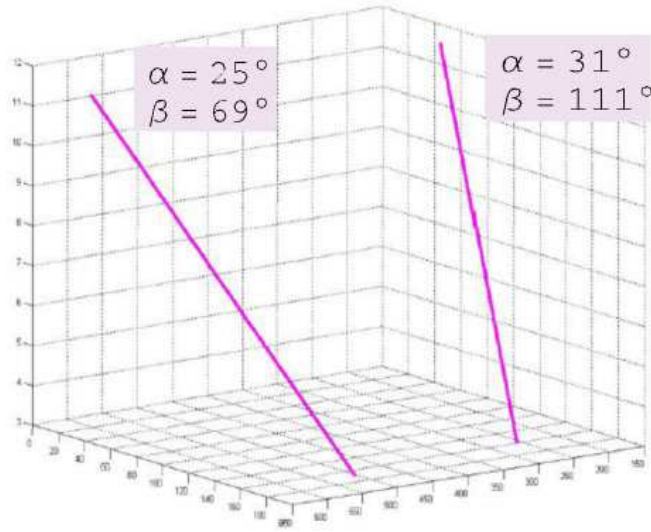


FIG. 4.22 – Approximation de la pose des doigts de la micropince par des segments de droites.

L'objectif est à présent de calculer les deux angles α et β donnant respectivement l'orientation du doigt autour de l'axe z et l'orientation autour de l'axe x , voir figure FIG. 4.23. De la régression linéaire 3D implémentée pour approximer chaque organe terminal de la micropince par un segment de droite, nous définissons les points p_1 et p_2 . Ces points 3D ont, respectivement, pour coordonnées (x_1, y_1, z_1) et (x_2, y_2, z_2) . Ainsi, nous pouvons accéder aux valeurs numériques des angles α et β par les relations suivantes :

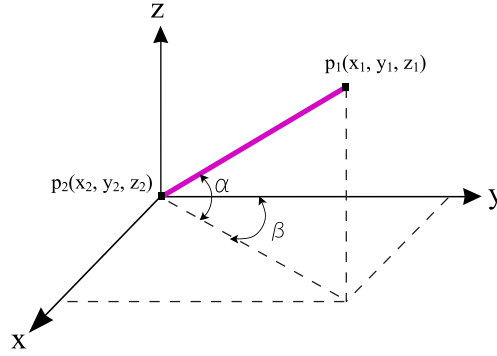


FIG. 4.23 – Représentation azimutale α et élévation β d'un doigt dans l'espace.

$$\alpha = \arctan \left(\frac{z \cdot dist}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (4.23)$$

et

$$\beta = \arccos \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (4.24)$$

avec :

$$x = x_1 - x_2 \quad (4.25)$$

$$y = y_1 - y_2 \quad (4.26)$$

$$z = z_1 - z_2 \quad (4.27)$$

Les valeurs numériques de α pour les deux doigts de la micropince, sont respectivement : 25 ° et 31 °. Pour ce qui concerne l'angle β , les valeurs numériques obtenues, toujours pour les deux doigts, sont : 69 ° et 111 °. Intéressons-nous davantage à l'angle α qui représente l'inclinaison des doigts par rapport au plan de manipulation. La différence $\Delta\alpha$ entre les deux doigts est chiffrée à 6 ° sachant qu'au départ, ces mêmes doigts ont été jugés (visuellement) bien alignés. Par exemple, pour une longueur de 1 mm des organes terminaux (c'est le cas des doigts de la pince qui équipent la station PRONOMIA), un décalage, à l'extrémité, de près de 10 μ a été constaté.

Sur la figure FIG. 4.24.(a), est illustré un exemple de saisie d'un micro-objet sans alignement au préalable des organes terminaux de la micropince. La figure FIG. 4.24.(b) montre une saisie d'objet avec des doigts parfaitement alignés. La différence sur la maîtrise de la saisie est flagrante.

- **Discussion** : Les algorithmes et techniques développés dans ce chapitre sont multiples et variés. Pas moins de trois approches sont traitées : l'autofocus, le tracking du système de préhension par le microscope optique et enfin le shape-from-focus. Toutes ces applications sont facilement transposables sur n'importe quelle station de micro-assemblage.

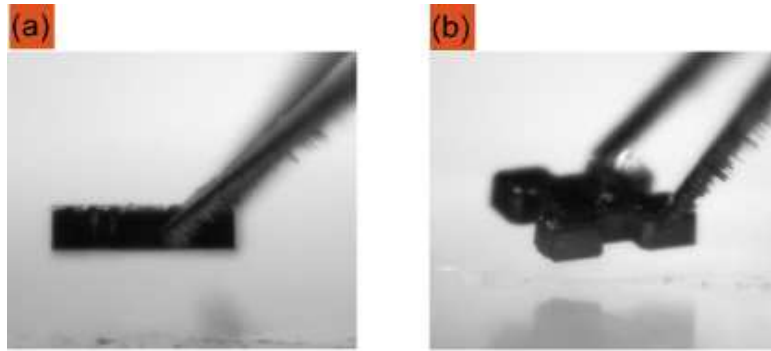


FIG. 4.24 – Différence entre une saisie maîtrisée (avec des doigts alignés) et une saisie complètement ratée (doigts non alignés).

C'est chose faite sur les stations dont dispose notre laboratoire. Ces outils sont essentiels dans le travail mené pendant cette thèse en vue de l'automatisation *intégrale* des tâches de micromanipulation et de micro-assemblage. L'ensemble du travail d'implémentation et d'intégration est relativement facile. Pour ce qui concerne leurs performances, d'une part, la robustesse de l'autofocus s'est avérée bonne à travers les différents tests de validation effectués. Le même constat pour la partie concernant le tracking de la micropince par le microscope optique lors des tâches de micromanipulation. D'autre part, le temps de calcul pour ces méthodes reste relativement faible. Concernant la partie consacrée au shape-from-focus et pose-from-focus, les algorithmes sont implémentés pour le moment sous *Matlab*, donc un effort doit être apporté à ce niveau là pour espérer un temps de calcul raisonnable. Ensuite, la qualité de la reconstruction 3D du micro-objet en utilisant l'information sur le focus dans une série d'images dépend fortement de la qualité de ces dernières. Suivant la forme, le type matériau ou encore les conditions d'illumination de la scène, les résultats du shape-from-focus et donc du pose-from-focus changent considérablement. En fonction de ces conditions, les filtres implémentés sont plus ou moins robustes.

4.7 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons proposé quelques techniques essentielles pour conduire à l'automatisation d'une station de micro-assemblage. Ces techniques ont toutes un dénominateur commun qui est le focus. Un autofocus a été implémenté en utilisant quatre estimateurs du focus différents : le gradient de Brenner, l'auto-corrélation, la variance et les ondelettes de Haar. Cette application a été intégrée dans le logiciel de pilotage du microscope optique Leica MZ16A. L'autofocus est une étape qui se déroule normalement à l'initialisation. Afin d'éviter de recommencer cette opération à chaque fois, un tracking du système de gripping a été pensé, ceci de manière à suivre la micropince, lors des tâches de micro-assemblage, par le microscope à l'aide de la motorisation du focus dont dispose ce dernier. Grâce à cette application, la focalisation sur le micro-objet entre les doigts

de la pince est continuellement assurée. D'autre part, nous nous sommes intéressés à la reconstruction 3D des micro-objets notamment à celle des organes terminaux de la micro-pince. La méthode adoptée est le shape-from-focus. Cette méthode utilise les techniques d'estimation du focus dans une image. Cette méthode combine la petite profondeur de champ du système optique avec l'acquisition de séries d'images à différentes distances focales. Sur une série d'images acquises, nous calculons le degré de netteté de chaque pixel suivant l'axe du scan en utilisant un estimateur de type variance. Cette estimation est suivie par des approches de filtrage permettant d'éliminer les fausses détections. Enfin, une reconstruction 3D de l'objet est proposée soit en utilisant une visualisation par des fonctions *Matlab* soit en utilisant *OpenGL*. De cette reconstruction 3D, nous avons pu parfaitement estimer la pose des organes terminaux dans le référentiel 3D.

Les résultats présentés dans ce chapitre et ceux présentés dans le chapitre [3] seront utilisés dans le chapitre suivant. Le chapitre [5] sera consacré au développement de lois de commande référencées vision de type asservissement visuel 2D multi-échelle.

PARTIE II

Asservissement visuel 2D multi-échelle pour la micromanipulation et asservissement visuel 3D pour le micro-assemblage de MEMS 3D

Asservissement visuel 2D multi-échelle pour la micromanipulation

Ce chapitre est consacré à la micromanipulation automatique de différents micro-objets artificiels. Le travail présenté dans cette partie du manuscrit est positionné dans le domaine à travers un bref état de l'art sur l'automatisation de la micromanipulation et du micro-assemblage en utilisant l'information provenant d'un capteur de vision. La commande développée est de type asservissement visuel 2D multi-échelle et cela à partir d'une seule vue à l'aide d'un microscope photonique frontal. La validation de ce processus de manipulation passe par l'évaluation des critères suivants : répétabilité, précision, temps de cycle, taux de réussite et d'échecs, etc. Pour ce faire, des cycles de prise et dépose ont été implémentés pour évaluer les approches développées. Un intérêt a été porté à l'analyse des résultats dans l'objectif d'apporter des améliorations. Après une analyse des résultats, nous avons proposé des solutions pour améliorer les performances obtenues. Une méthode planification et de suivi de trajectoire a été étudiée et implémentée pour contourner le problème des occultations ou sorties du champ de vision microscope optique des micro-objets manipulés durant les tâches de positionnement.

Sommaire

5.1	Introduction	100
5.2	Classification des asservissements visuels	103
5.2.1	Look and move	103
5.2.2	Asservissement visuel 2D	105
5.2.3	Asservissement visuel 3D	105
5.2.4	Asservissement visuel 2D1/2	107
5.2.5	Asservissement visuel d2D/dt	107
5.3	Modélisation type d'une loi de commande en asservissement visuel	107
5.4	Bref tour d'horizon sur l'utilisation de l'asservissement visuel dans le micromonde	109
5.5	Algorithme de tracking "ESM"	114
5.6	Asservissement visuel 2D multi-échelle	115
5.6.1	Modélisation multi-échelle	116
5.6.2	Commande en fermeture du gripper	119
5.7	Partie expérimentale	120
5.7.1	Configuration de la station SAMMI	120
5.7.2	Cycle de pick and place automatisé	125
5.8	Étude et analyse des résultats obtenus	130
5.9	Améliorations à apporter	132
5.10	Planification de trajectoire	132
5.10.1	Paramétrisation de la courbe par un polynôme Bézier	135
5.10.2	Application à la manipulation de microbilles	135
5.10.3	Résultats expérimentaux	136
5.10.4	Manipulation de microfibres optiques	137
5.11	De la micromanipulation vers le micro-assemblage	140
5.12	Conclusion	141

5.1 Introduction

L'asservissement visuel qui est une manière de joindre la perception de l'environnement à l'action sur cet environnement par un robot, est à l'intersection de la robotique, l'automatique et la vision par ordinateur. Au fait, de la perception (à travers un capteur) naît une action (mouvement) du robot. Du point de vue commande, cela s'appelle donc asservissement visuel. Par contre, du point de vue perception (c'est-à-dire à travers l'action, une perception est générée), dans ce cas là, on parle plutôt de vision active. Pendant longtemps, la perception et l'action ont été considérées comme complètement indépendantes. Cependant, depuis quelques années, les deux communautés se sont rapprochées et considèrent ces deux domaines comme étroitement liés. Il est à noter que dans ce manuscrit, nous emploierons le terme asservissement visuel

pour désigner les deux approches. La commande référencée capteur a fait l'objet de nombreux travaux ces dernières décennies. Nous pouvons citer les travaux de Shirai et al. [SI73], de Weiss et al. [WSN87], d'Espiau et al. [ECR92], Hutchinson et al. [HHC96] et bien d'autres. Les domaines de prédilection de la commande référencée capteur sont nombreux et variés. Pour en citer quelques uns, on peut penser aux robots manipulateurs [AYTM93], à la conduite automatique de véhicule [KMM+96], à la robotique chirurgicale [KGD+03], [CGdMF06], [MHI+06] à la robotique sous-marine [Lot06], aux engins volants [Bou08], etc. Cela concerne ici des applications réelles en robotique. La commande référencée capteur de vision trouve aussi des applications dans le monde virtuel, par exemple dans le cadre de l'animation d'entités artificielles ou encore de la réalité augmentée [BPB99], [ASB07].

Plus récemment, l'asservissement visuel a trouvé une application toute nouvelle celle de la manipulation ou de l'assemblage de microsystèmes en utilisant non plus une caméra conventionnelle mais plutôt un microscope optique, voire même des systèmes de vision beaucoup plus sophistiqués comme le MEB (voir chapitre [2]). C'est dans ce contexte que la deuxième partie de ce manuscrit s'inscrit, c'est-à-dire l'asservissement visuel au service de la microrobotique, de manière plus précise, au service de la micromanipulation et du microassemblage automatique.

Rendre les robots conventionnels ou les microrobots autonomes nécessite l'utilisation d'un capteur de vision. Ainsi, ils seront capables d'effectuer des tâches allant de la plus simple (positionner un effecteur sur une cible) à la plus complexe (évoluer dans un environnement parfaitement inconnu). Le choix de ce genre de capteur est justifié. En effet, un capteur de vision fournit, de manière très riche, des informations sur la position du robot ainsi que sur l'environnement qui l'entoure. En asservissement visuel, l'action est assurée par une boucle fermée sur l'information visuelle, comme le montre la figure FIG. 5.1. Sur cette figure le robot doit assurer une tâche classique en asservissement visuel qui est de réaliser un positionnement en déplaçant la caméra de façon à ce que l'image perçue corresponde à une image désirée. La tâche consiste donc à déplacer la caméra pour faire en sorte que l'objet soit parfaitement centré dans l'image. Si l'objet procède à un mouvement, l'ensemble caméra + robot (cas d'une caméra embarquée) doit le suivre, dans ce cas, on parle de tracking.

En asservissement visuel, la perception visuelle d'un objet peut être définie comme l'abstraction d'un ensemble de mesures visuelles sur l'objet que voit la caméra. Alors plusieurs questions se posent : quelle est la nature de ces informations visuelles (2D, 2D1/2, 3D) ? Quelle est leur forme (points, droites, cercles,...) ? Comment les choisir ? La modélisation de ces informations visuelles, afin de donner un comportement idéal au robot (par exemple au niveau de sa trajectoire) pendant une tâche d'asservissement visuel, peut être la réponse aux questions posées. Il est évident que mieux le robot perçoit son environnement, meilleur sera son comportement. La méthodologie utilisée pour ex-

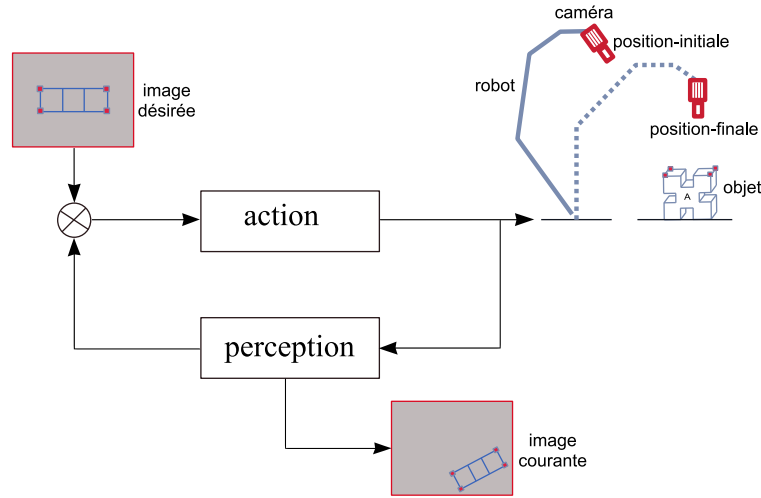


FIG. 5.1 – Boucle d’asservissement visuel.

traire des primitives visuelles dans un environnement est appelée traitement d’images ¹. Bien entendu, plus les informations sont de haut niveau (par exemple reconnaissance et localisation d’un objet dans un environnement riche en texture), plus les algorithmes de traitement d’images utilisés sont complexes. Ainsi, les techniques de traitement d’images sont une composante très importante dans un processus d’asservissement visuel.

Sur la figure FIG. 5.1, la caméra est portée par le robot, dans ce cas nous parlerons de caméra embarquée. L’ensemble robot + caméra est un système de type *eye in hand*. C’est la configuration la plus usuelle en pratique. Si la caméra est positionnée de manière à regarder le robot et la cible en même temps, on parlera alors de caméra déportée et de système de type *eye to hand* [FCM00]. Évidemment, en microrobotique, le choix de la configuration est vite tranché. Les raisons sont que la taille et le poids d’un microscope optique ou même d’un ensemble caméra et objectif sont exagérés par rapport à ceux d’un micromanipulateur ou d’un effecteur (micropince). Il est impossible d’envisager la conception d’un système de gripping pour la micromanipulation capable de supporter un microscope photonique, ceci sans risque d’endommager le gripper ou tout simplement de changer sa dynamique. Donc, si un jour nous voulons disposer d’un système de type *eye in hand*, il sera nécessaire de minimiser l’imageur. Dans ce cas, ceci constituera une nouveauté dans le domaine de la micromanipulation et du micro-assemblage par commande référencée capteur de vision. À la fin de cet ouvrage, nous discuterons de travaux de collaboration entrepris avec l’équipe de recherche du Professeur Michel Paindavoine du Laboratoire Électronique, Informatique et Image (LE2I) de l’Université de Bourgogne sur l’intégration d’un micro-imageur sur le système de gripping dont dispose la station SAMMI.

¹image processing, de l’anglais

Une fois la configuration de la caméra bien choisie et le choix des informations visuelles effectué, il sera question de l'élaboration de la loi de commande qui contrôlera le mouvement du robot. Comme il a été mentionné ci-dessus, la commande sera effectuée en boucle fermée. Théoriquement, pour aller d'une position initiale à une position désirée, il suffit d'une seule itération. Malheureusement, les différentes erreurs qui peuvent s'introduire dans ce processus nécessitent une répétition de la séquence *voir et se déplacer*² jusqu'à l'obtention d'une erreur entre la situation courante et la situation souhaitée inférieure à celle fixée lors de la définition de la tâche. L'utilisation de la boucle fermée peut être justifiée par la robustesse aux :

- erreurs d'extraction des informations visuelles (changement d'éclairage lors de la tâche d'asservissement qui induisent des erreurs au niveau des résultats des algorithmes de traitement d'images,
- erreurs d'estimation de la situation entre la caméra et son environnement, dues aux inévitables erreurs de calibrage des imageurs,
- erreurs du modèle du robot, dues aux imperfections que présente la structure robotique à la conception ou encore celles liées à sa modélisation,
- ...

La section suivante est dédiée à la classification réalisée des types d'asservissement visuels existants dans la littérature. Nous tentons de faire une classification en fonction du type d'informations visuelles utilisées pour établir la loi de commande. Nous mettons l'accent sur les approches proches de celles que nous avons développées pendant la thèse.

5.2 Classification des asservissements visuels

Malgré une classification effectuée en fonction des indices visuels introduits dans la boucle de commande, nous parlerons tout de même de la commande look and move statique et dynamique. Pour une raison, une de ces deux approches, en l'occurrence le look and move statique, a été étudiée et introduite dans la commande du système de gripping en fermeture pour la saisie des micro-objets de manière entièrement autonome.

5.2.1 Look and move

Le schéma de principe d'une commande de type look and move est montrée sur la figure [FIG. 5.2](#). Dans ce genre d'approche, les tâches à réaliser (souvent, il s'agit d'une tâche de positionnement), sont exprimées sous forme d'une situation à atteindre $\mathbf{r}^*(t)$ entre la caméra et l'objet. À chaque itération, la situation courante $\mathbf{r}(t)$ doit être estimée. On distingue deux types de commande dans l'approche look and move : le look and move statique et le look and move dynamique. Dans les deux cas, une interprétation des informations visuelles extraites de l'image courante est nécessaire. Deux hypothèses peuvent être posées : soit les dimensions de l'objet sont connues, soit la distance entre la caméra et l'objet est connue.

²look and move, de l'anglais

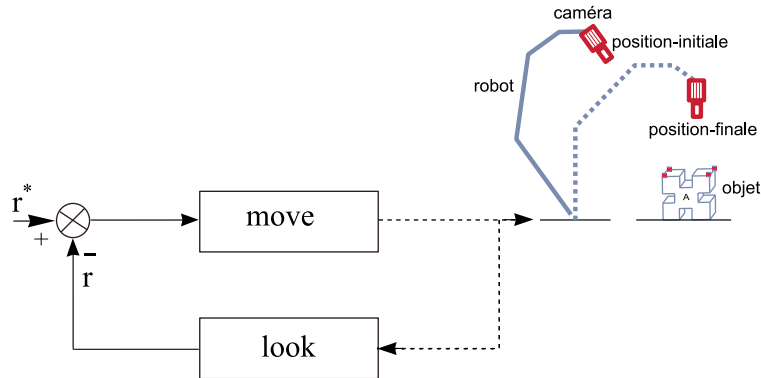


FIG. 5.2 – Look and move (Asservissement en situation).

- **Look and move statique** : son principe est tout simple et a fait l'objet de travaux dès le début des années 1970 par Agin [Agi77] et Kashioka et al. [KTS⁺77]. Son fonctionnement est expliqué dans le cadre du contrôle d'un robot par un asservissement classique dans l'espace cartésien. Il se déroule en deux étapes. Premièrement, la caméra acquiert une image et à l'aide d'un algorithme de traitement d'images, des informations visuelles sont extraites permettant d'estimer la différence entre la position de la caméra courante et désirée. Deuxièmement, une commande est calculée et envoyée sous forme d'une consigne dans l'espace cartésien, en passant par un modèle géométrique inverse du robot. Ces deux étapes sont répétées par le robot après l'accomplissement du déplacement calculé.

- **Look and move dynamique** : c'est une approche similaire à celle du look and move statique. Une exception est faite sur l'exécution des deux étapes "look" et "move" qui sont ici exécutées de manière simultanée, d'où le terme dynamique. Malheureusement, ces deux étapes peuvent avoir une cadence différente. Pour cela, la loi de commande doit prendre en considération cet écart de cadence afin d'améliorer la stabilité du système. La révolution du look and move dynamique repose assurément dans le remplacement du modèle géométrique inverse par un module appelé le *jacobien*. Le jacobien permet de prendre en compte l'aspect dynamique du système et ainsi de pouvoir garder l'objet dans le champ de vision de la caméra pendant les déplacements du robot. Cette méthode peut convenir à des tâches d'asservissement visuel sur un objet mobile, tâches qui étaient impossibles à assurer par une approche look and move statique.

Les premiers travaux relatifs à cette approche ont été publiés par Agin [AGi79] pour une application de suivi de pièces sur un tapis roulant. Dans la même année, d'autres travaux équivalents ont été proposés par Ward et al. [WRHD79].

Au début des années 1980, bon nombre de chercheurs commencèrent à s'intéresser à d'autres lois de commande toujours basées sur un retour visuel. Ces nouvelles lois de commande se veulent plus robustes, plus stables, plus dynamiques et permettent de

réaliser des tâches de plus en plus complexes. Pas moins de quatre nouvelles approches ont été apportées dans le domaine de l'asservissement visuel. Ces approches sont l'asservissement 2D, l'asservissement 3D, l'asservissement 2D 1/2 et enfin l'asservissement d2D/dt. Toutes ces approches ont un point commun, c'est l'aspect dynamique. Il est bon de rappeler que cette classification tient seulement compte de la nature des indices visuels utilisés pour l'élaboration de la loi de commande.

5.2.2 Asservissement visuel 2D

Chez les anglo-saxons, on parle d'**image-based visual servoing** (IBVS) pour désigner une loi de commande de type 2D. Comme son nom l'indique, la loi de commande est élaborée à partir d'informations visuelles (appelées également visual features ³) exclusivement extraites de l'image, donc 2D. La consigne est alors exprimée comme la différence entre un motif courant et un motif désiré dans l'espace image. Ces primitives peuvent être des points, des segments de droites, des droites, des cercles, des moments, ou tout autre type ou combinaison d'informations géométriques extraites de l'image. Il est conseillé de se référer aux travaux de thèse de François Chaumette [Cha90], sur la méthodologie à suivre pour l'élaboration des lois de commande à partir d'un bon nombre des primitives visuelles citées ci-dessus.

La première loi de commande de type asservissement visuel 2D est due à Weiss [Wei84]. L'avantage de ce genre d'approche réside dans sa robustesse aux erreurs d'étalonnage [Esp93] et aux erreurs de traitement d'images. En revanche, le fait d'utiliser des informations 2D ne permet pas un contrôle direct de la pose \mathbf{r} du robot, i.e. il n'existe aucun contrôle de la trajectoire du robot dans l'espace cartésien 3D. Le robot, au lieu d'atteindre la pose désirée, peut se retrouver dans un minimum local [Cha97]. D'un autre côté, l'incapacité à contrôler la trajectoire du robot dans l'espace peut venir, également, de la présence de singularités dans la matrice d'interaction (certaines informations visuelles deviennent linéairement dépendantes). Ainsi, des problèmes de stabilité de la commande sont à prévoir. C'est autour de ces problématiques que des travaux de recherche sont toujours menés pour améliorer le comportement d'un robot avec un asservissement 2D. Mahony et al. [MCC02] ont proposé une technique d'asservissement visuel 2D ayant un comportement satisfaisant dans l'espace cartésien en intégrant une information visuelle proportionnelle à la profondeur de l'objet.

Le schéma de principe d'un asservissement visuel 2D et d'un asservissement visuel 3D sont regroupés sur la figure FIG. 5.3. Désormais, nous connaissons le principe de fonctionnement de l'asservissement visuel 2D, essayons d'en apprendre davantage sur l'asservissement visuel 3D.

5.2.3 Asservissement visuel 3D

Il est appelé également **pose-based visual servoing** (PBVS). Le PBVS utilise en entrée de la boucle de commande des informations tridimensionnelles notés \mathbf{P}^* (\mathbf{P} , pour les informations extraites de l'image courante) exprimées dans un repère euclidien (voir

³primitives visuelles

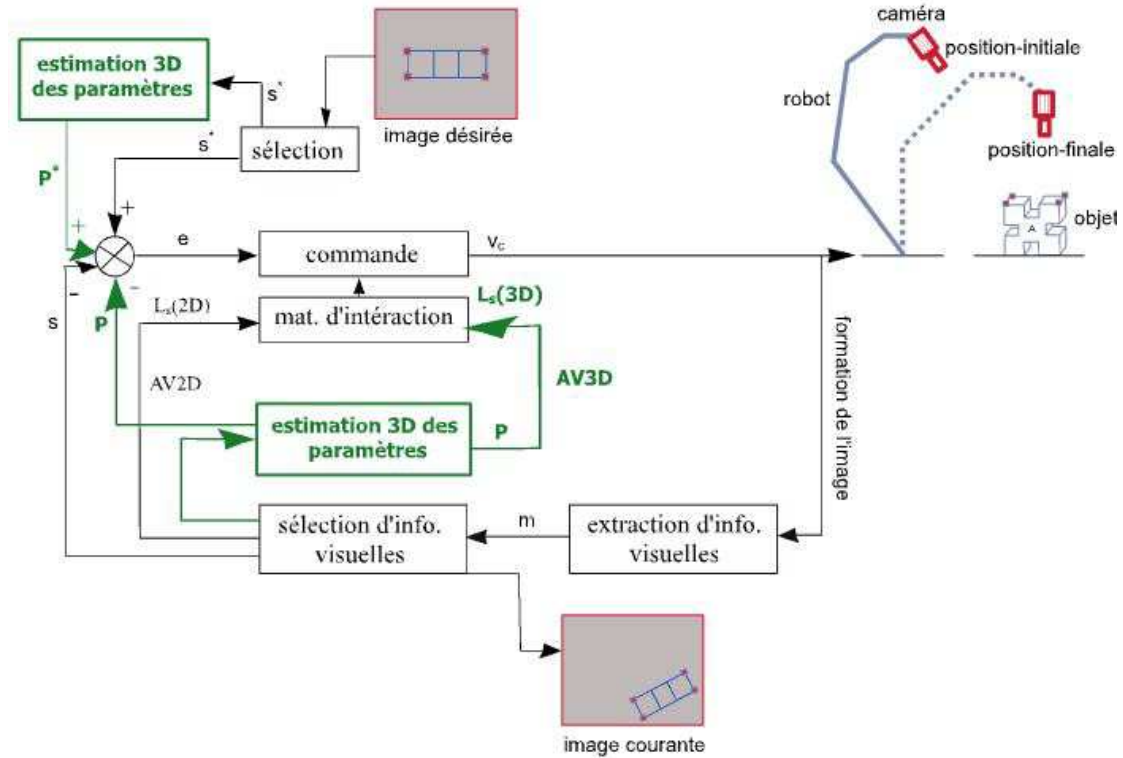


FIG. 5.3 – Asservissement visuel.

figure FIG. 5.3). Plus précisément, dans le cadre d'une tâche de positionnement rigide (c'est-à-dire utilisant les six degrés de liberté de la caméra), la consigne peut s'exprimer sous la forme d'un déplacement 3D à réaliser [WHB96] directement en utilisant les coordonnées de points 3D [MGK96]. Pendant longtemps, les chercheurs ont considéré que l'AV3D nécessitait obligatoirement une étape de reconstruction 3D de la scène. Une étape très gourmande en temps de calcul et très sensible aux erreurs de calibrage. Malgré le fait qu'il présente un contrôle du robot dans l'espace cartésien qui donne donc une trajectoire du robot plus correcte, l'AV3D a été considéré pendant quelques années comme étant moins intéressant que son aîné l'AV2D. Par la suite l'apparition des méthodes d'estimation de la pose 3D sans étape de reconstruction 3D ou de systèmes de vision distribués (2 caméras, voire plus), a apporté un deuxième souffle à l'asservissement visuel 3D. Ces méthodes sont capables d'estimer la pose 3D en utilisant une seule caméra et à des cadences élevées (temps-réel), [Low91], [DD95], [CMC03a]. Nous reviendrons sur cette approche dans le chapitre [6] où nous détaillerons la méthode d'asservissement 3D développée pour le micro-assemblage de MEMS.

5.2.4 Asservissement visuel 2D1/2

Contrairement aux méthodes décrites ci-dessus, le bouclage sur la commande en asservissement 2D1/2 est fait, soit en utilisant des informations décrites directement dans l'image (AV2D) soit dans le repère caméra (AV3D). La nouvelle approche développée par E. Malis dans le cadre de sa thèse [Mal98] est appelé asservissement visuel 2D1/2. Cette nouvelle approche utilise comme information à la fois des informations directement exprimées dans l'image et des informations exprimées dans le repère de la caméra. La loi de commande 2D1/2 est fortement découplée. Elle a l'avantage d'un contrôle partiel dans l'image qui permet de conserver l'objet dans le champ de vue de la caméra. Plus précisément, cette approche est basée sur l'estimation de l'homographie entre des points appariés d'une image à une autre [Fau93]. À partir de l'homographie obtenue, il est possible de calculer le déplacement en rotation de la caméra entre sa position courante et sa position désirée (contrôle des degrés de liberté en rotation du robot). Les déplacements de la caméra en translation peuvent être déduits à partir d'informations dans l'image (contrôle des degrés de liberté en translation du robot). Le fort découplage de la loi de commande apparaît donc à ce niveau, ce qui explique l'originalité de cette approche [MCB98].

5.2.5 Asservissement visuel d2D/dt

À l'opposé des techniques présentées précédemment, l'asservissement d2D/dt [CAD95], [SVS97] puise son originalité dans l'utilisation non pas d'informations géométriques pour la régulation à zéro entre les positions courante et désirée mais plutôt d'un champ de vitesses. Le principe de la commande repose alors sur le contrôle des mouvements de la caméra de telle sorte que le mouvement 2D mesuré atteigne un champ de vitesses désirée, d'où l'appellation d'asservissement visuel d2D/dt.

5.3 Modélisation type d'une loi de commande en asservissement visuel

Rappelons qu'une loi de commande en asservissement visuel consiste à contrôler le mouvement d'un système dynamique à partir d'informations visuelles calculées à partir d'une image $\mathbf{s}(\mathbf{r})$, où \mathbf{r} est la position de la caméra par rapport à une repère monde $\mathcal{R}_{\mathcal{F}}$. L'objectif est d'atteindre une position désirée \mathbf{s}^* en suivant une trajectoire $\mathbf{s}^*(t)$. La position finale (désirée) est atteignable par la minimisation de l'erreur \mathbf{e} par la relation suivante :

$$\mathbf{e} = \mathbf{s}(\mathbf{r}) - \mathbf{s}^* \quad (5.1)$$

Par la dérivation de $\mathbf{s}(\mathbf{r})$ par rapport au temps, nous pouvons approximer la relation qui relie la variation de \mathbf{s} aux variables de contrôle. Cette dérivation est formulée

sous forme d'une matrice qui s'appelle **matrice d'interaction** et elle est donnée par l'équation ci-dessous.

$$\dot{\mathbf{s}} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{L}_s(\mathbf{s}, Z) \mathbf{v} \quad (5.2)$$

où \mathbf{L}_s est la matrice d'interaction associée aux informations visuelles \mathbf{s} mais qui dépend également de la profondeur de l'objet Z ; \mathbf{v} est le torseur cinématique de la caméra qui regroupe les trois vitesses de rotation ω_x, ω_y et ω_z et les trois vitesses de translation $\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y$ et \mathbf{v}_z .

S'il est question d'une commande dans l'espace articulaire du robot, il faut introduire le jacobien du robot dans la relation (5.2). Le jacobien permet de passer des variations $\dot{\mathbf{s}}$ dans l'image à des variations articulaires $\dot{\mathbf{q}}$ du robot.

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s(\mathbf{s}, Z) \mathbf{J}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (5.3)$$

La minimisation de l'erreur (**la commande**) entre la position courante et la position désirée se fait suivant **la fonction de tâche** introduite par Espiau et *al.* [ECR92], [SLE91]. En effet, l'erreur est définie par la **fonction de tâche** sous la forme suivante :

$$\mathbf{e} = \mathbf{C}(\mathbf{s}(\mathbf{r}) - \mathbf{s}^*) \quad (5.4)$$

où \mathbf{C} est une matrice $6 \times k$ de rang plein appelée également matrice de combinaison qui permet de prendre en compte un nombre k d'informations visuelles \mathbf{s} plus grand que le nombre de degrés de liberté (ddl) du robot. La loi de commande la plus utilisée est celle de la décroissance exponentielle découplée de la fonction de tâche. Elle s'exprime sous la forme suivante :

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e} \quad (5.5)$$

où λ est le facteur de réglage de la vitesse de décroissance.

Pour une matrice de combinaison constante, la relation (5.4) devient :

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{C} \mathbf{L}_s \mathbf{v} \quad (5.6)$$

La combinaison des deux équations (5.5) et (5.6), nous offre alors la loi de commande dans un cas idéal. Elle s'exprime donc sous la forme suivante :

$$\mathbf{v} = -\lambda (\mathbf{C} \mathbf{L}_s)^{-1} \mathbf{e} \quad (5.7)$$

La matrice d'interaction prend en compte également la distance Z qui est la profondeur entre la caméra et l'objet. Généralement, cette profondeur est difficilement estimable. Une approximation de Z est souvent utilisée. Donc en pratique la loi de commande (5.7) devient avec une approximation de \mathbf{L}_s par $\widehat{\mathbf{L}}_s$.

$$\mathbf{v} = -\lambda (\mathbf{C} \widehat{\mathbf{L}}_s)^{-1} \mathbf{e} \quad (5.8)$$

Pour un meilleur *comportement* de la matrice d'interaction, notamment dans le cas où les informations visuelles utilisées sont de nature 2D, il vaut mieux choisir $k > \text{nombre de ddl}$, c'est-à-dire disposer de primitives visuelles redondantes. Dans ce cas, \mathbf{C} peut être choisie comme étant la pseudo inverse de la matrice d'interaction ($\mathbf{C} = \widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}^+$). On peut écrire alors :

$$\mathbf{v} = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}^+ (\mathbf{s}(\mathbf{r}) - \mathbf{s}^*) \quad (5.9)$$

Deux configurations sont possibles pour $\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}$, ceci en fonction du choix du modèle de la matrice d'interaction. Soit $\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}$ est constante, c'est-à-dire $\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}} = \mathbf{L}(\mathbf{s}^*, Z^*)$. Ce choix nécessite la connaissance, même approximative, de Z^* qui correspond à la profondeur désirée à atteindre. Une autre forme de la matrice d'interaction est possible ($\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}} = \mathbf{L}(\mathbf{s}^*, \hat{Z})$, cette fois-ci $\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}$ n'est plus constante. La matrice $\mathbf{L}_{\mathbf{s}}$ varie au cours du temps, c'est-à-dire à chaque itération, $\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}$ est recalculée avec une estimation de Z^* en ligne. Généralement, la première approche (avec $\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}$ constante) est plus stable et présente moins de problèmes de convergence [MR03]. Cependant, il existe d'autres formes (choix) de $\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}$ proposées dans la littérature.

Pour assurer la convergence de \mathbf{e} , on dispose de la condition suffisante suivante :

$$\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}^+ \mathbf{L}_{\mathbf{s}} > 0 \quad (5.10)$$

Un état de l'art sur l'utilisation de commande référencée capteur de vision appliquée à la micromanipulation et/ou au micro-assemblage est dressé ci-dessous.

5.4 Bref tour d'horizon sur l'utilisation de l'asservissement visuel dans le micromonde

Nous avons jugé utile de faire un bref état de l'art, non pas des approches d'asservissement visuel existantes, mais plutôt des approches utilisées dans le micromonde pour la micromanipulation et le micro-assemblage. Dans cette étude sur le type de commande utilisée pour les tâches de micromanipulation ou de micro-assemblage à assurer, nous porterons un intérêt sur la précision obtenue, le temps de cycle nécessaire pour effectuer une tâche, le nombre d'imageurs dont dispose la station de micro-assemblage, la difficulté de la tâche, le jeu mécanique toléré pour l'assemblage, etc. Une fois l'état de l'art établi, nous aborderons la modélisation d'une commande par asservissement visuel 2D multi-échelle pour la micromanipulation. Cette commande intègre la gestion du zoom. L'approche développée sera validée sur la station de micro-assemblage SAMMI. À cet effet, une description plus détaillée de tous les éléments qui composent cette station (partie mécanique, imageur, système de grippage, table anti-vibration, hotte à flux laminaire, ...) sera effectuée.

D'après la littérature, la tâche en micro-assemblage la plus étudiée est celle du positionnement de micro-objets à un endroit défini. Ensuite, la *communauté micro* a commencé à s'intéresser à des tâches plus compliquées comme l'insertion de type *aiguille dans*

*un trou*⁴. Ces deux tâches ont fait l'objet de travaux sur plus d'une décennie. Parmi les travaux, sans doute les plus aboutis dans ce domaine, on peut citer ceux de Nelson et ses collègues [VN99], [NRZV99], [ZN99], [RVN00]. Ces travaux menés dans un premier temps aux USA, à l'Université de Minnesota, se sont poursuivis par la suite à l'École Polytechnique Fédérale de Zurich (ETHZ) en Suisse. Une station de micro-assemblage a été développée pour la réalisation d'une tâche d'insertion d'un micro-objet en silicium de $228.5\ \mu\text{m}$ dans un trou de $245\ \mu\text{m}$ sur un wafer. La tolérance d'insertion était de **$18.5\ \mu\text{m}$** . À cet effet, une commande par retour visuel multi-échelle a été proposée. Cette commande permettait de commuter entre les différents objectifs du microscope photonique ($2\times$, $10\times$, $20\times$ et $50\times$) en fonction du besoin d'une vue globale ou d'une vue plus locale de la scène. Des travaux similaires ont été réalisés par Yang et al. [YGN03]. La tâche de micro-assemblage en elle-même consistait en l'insertion d'un micro-objet métallique de dimension $500\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ dans une fente de $520\ \mu\text{m} \times 110\ \mu\text{m}$. Comme nous pouvons le remarquer, la tolérance d'insertion est estimée à **$20\ \mu\text{m}$** dans un sens et **$10\ \mu\text{m}$** dans l'autre sens. Là encore, c'est une commande multi-échelle et multi-imageurs qui a été proposée. Pas moins de quatre imageurs équipent la station de micro-assemblage. Ils sont répartis de la manière suivante : un microscope optique offre la vue de dessus, deux caméras équipées d'un objectif pour les vues de côté et enfin une autre caméra avec un objectif à grandissement moins important pour une vue globale. Au Laboratoire National Sandia, l'équipe de Feddema [FS98] a proposé d'utiliser un asservissement visuel avec une seule vue sous microscope photonique. La consigne qui est l'image de référence de l'asservissement est récupérée par image de synthèse à partir du modèle CAO. Aucune tâche spécifique n'a été réalisée pendant ces travaux. Tao et al. [TCC05] se sont intéressés à une tâche d'insertion de type aiguille dans un trou. La dimension de l'objet à insérer était de $450\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ dans le trou qui mesurait $650\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ avec une tolérance d'insertion donc de **$200\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$** . L'originalité de ces travaux résidait dans l'utilisation d'une commande par asservissement visuel multi-échelle en intégrant la gestion du zoom dans la commande.

À l'Université d'Arlington du Texas, aux USA, Popa et al. [PKSZ02] ont réussi à mettre un jeu de 32 microfibres optiques dans des fentes en forme de V gravées sur un wafer en silicium. L'approche utilisée pour boucler sur la commande est de type look and move. Chaque fibre mise dans une fente nécessite une durée d'une minute. La station de micro-assemblage à 4 ddl comporte un seul ensemble caméra + objectif. À la fondation Robotiker en Espagne, H. Hötzenroder et al. [HFGB] utilisaient un microscope photonique en vue de dessus et deux caméras avec objectifs montées en stéréoscopie. Ils utilisaient ces dernières pour déterminer, par triangulation stéréoscopique, la position dans l'espace de l'effecteur d'un minirobot qui sera utilisée pour la micromanipulation. La détection de l'effecteur par traitement d'images a été simplifiée par l'intégration d'un marqueur de type LED sur le système de gripping. Enikov et al. [EM04] ont travaillé sur l'assemblage automatique d'une série de micro-objets en nickel de $500\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$. Un taux de réussite relativement faible (37 %) bien que d'une précision intéressante de $7\ \mu\text{m}$

⁴peg into a hole, de l'anglais

et $4\text{ }\mu\text{m}$ suivant les axes x et y a été obtenue. Bien évidemment, la loi de commande est en boucle fermée dans l'image (AV2D).

Plus récemment, J. Wilson et *al.* [WGW⁺07] ont proposé un assemblage de façon verticale d'un micro-objet carré de $300\text{ }\mu\text{m}$ de côté dans une fente. Un cycle de pick and place du composant micrométrique a été développé. Le cycle est fait de manière automatique et à l'arrivée pour l'insertion, l'opérateur humain intervient. Pour ce faire, deux C-mount microscopes équipés d'un zoom commandable ont été utilisés. Le temps nécessaire pour effectuer un cycle complet a été estimé à 5 minutes. À l'Université de Karlsruhe, en Allemagne, Fatikow et *al.* [FBS99], utilisaient une vue globale obtenue à l'aide d'une caméra équipée d'un objectif standard, pour localiser et placer le robot de façon grossière. Pour placer le préhenseur de manière fine, ils utilisaient une triangulation par laser observé par un microscope photonique placé au dessus. Un an plus tard, Fatikow et *al.* [FSBS00], ont proposé une méthodologie de manipulation en incluant, cette fois-ci, un microscope électronique à balayage dans le système. Toujours Fatikow et son équipe [SF05], quelques années plus tard à l'Université d'Oldenburg, ont proposé d'utiliser pleinement le MEB. Cependant, la vue fournie par le MEB n'est pas suffisante dans la tâche d'asservissement visuel, c'est pourquoi ils ont ajouté deux caméras de faibles dimensions à bas coût. L'estimation de la position de l'effecteur est obtenue par une méthode de corrélation à partir de formes pré-enregistrées. Dans l'article paru en 2007, Fatikow et *al.* [FWH⁺07] décrivent une série de travaux, cette fois-ci, sur la nanomanipulation en utilisant une structure microrobotique placée à l'intérieur du MEB. Ils ont démontré la faisabilité de tâche de manipulation à l'échelle nanométrique avec une commande référencée vision MEB. Même si les tâches à réaliser sont relativement simples, cela ouvre la voie à des applications très intéressantes dans le domaine de l'assemblage de NEMS.

En 2004, M. Weck et *al.* [WP04], ont équipé leur station de micromanipulation d'un imageur original. Un fibroscope monté entre les organes terminaux du système de gripping, ceci de façon à obtenir une image de la micropince lors des opérations de micromanipulation. Le fibroscope est un système de vision composé d'un faisceau de fibres optiques souples dont le diamètre varie de quelques centaines de microns à quelques millimètres en fonction du besoin. Plus le diamètre est faible, plus la résolution de l'image obtenue est intéressante. Le fonctionnement de ce type d'imageur est fait de telle sorte que chaque fibre renvoie une information lumineuse équivalente à un pixel. La somme des informations renvoyées par le fibroscope constitue donc une image de la scène. Ainsi, si les fibres optiques sont distribuées à la fois sur la partie gripper et à la fois sur la scène, cela permet d'avoir en quelque sorte une vue locale et une vue globale. Une approche par asservissement visuel serait donc très intéressante à appliquer avec ce genre d'imageurs. Encore plus intéressant, quelques fibres optiques peuvent être dédiées non pas au retour d'informations mais comme source de lumière très précise. Hélas, en pratique, la résolution d'un fibroscope n'excède pas les $50\text{ }\mu\text{m}/\text{pixel}$. Un exemple d'utilisation du fibroscope est montré sur la figure FIG. 5.4.

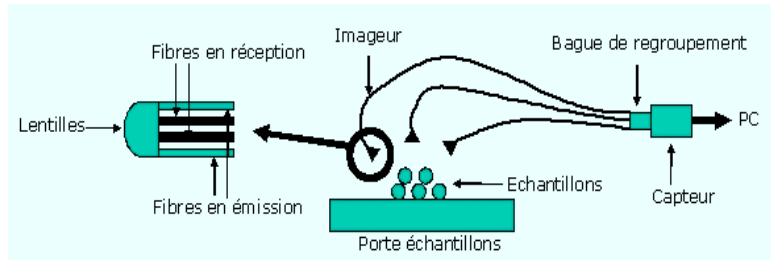


FIG. 5.4 – Exemple d'utilisation du fibroscope en micromanipulation.

En Asie, plus précisément à l'Université de Tokyo au Japon, Kasaya et *al.* [KMSS99] proposant l'association de deux imageurs distincts. Un MEB est utilisé pour la vue de dessus secondé par un microscope photonique pour la vue de côté. Ils ont développé des méthodes de traitement d'images basiques pour le calcul de primitives visuelles pour le bouclage de la commande sur ces informations. Des cycles de micromanipulation de type pick and place ont été implémentés pour expérimenter leurs développements. À l'Institut de Science et de Technologie de Corée (KIST), Seok Lee et *al.* [LKK⁺01] et K. Kim et *al.* [KKLeL02] utilisent des méthodes de mise en correspondance de formes par corrélation et d'autofocus dans leur manipulation en utilisant un asservissement visuel de type look and move. Ils utilisent un microscope photonique stéréoscopique de chez Leica. Par contre, l'information stéréoscopique n'est pas exploitée, le traitement n'est fait que sur une des vues de dessus. Les méthodes qu'ils présentent sont développées pour des tâches simples de micromanipulation.

D'autres travaux très intéressants sont répertoriés dans la littérature. Malgré qu'ils ne présentent des uniquement que des réalisations en mode télé-opéré ou en mode semi-automatique (une partie du processus d'assemblage est automatisée), nous avons jugé important de les citer comme par exemple, les travaux de Dechev et ses collègues [DCM03], [DCM04] menés dans le développement de stations de micro-assemblage et différents MEMS très aboutis. La figure FIG. 5.5 illustre un MEMS assemblé par l'équipe de N. Dechev [BDSNC07] avec une station de micro-assemblage à 6 ddl équipée d'un système de gripping passif. En addition à ces réalisations, Aoki et *al.* [AMH⁺03] ont publié leurs travaux dans la prestigieuse revue scientifique Britannique *Nature* sur le micro-assemblage d'une nouvelle génération de semi-conducteurs cristaux photoniques 3D. La tâche d'assemblage consistait dans l'empilement de couches de silicium très fine ($25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m} \times 0.5\ \mu\text{m}$) guidées par huit sphères de $1\ \mu\text{m}$ de diamètre, gravées sur les quatre cotés de chaque élément à assembler.

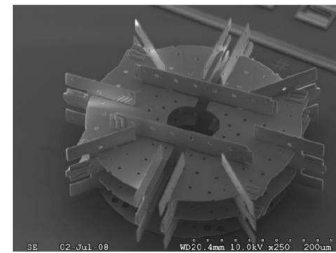


FIG. 5.5 – micro-eolienne assemblée par l'équipe de Dechev.

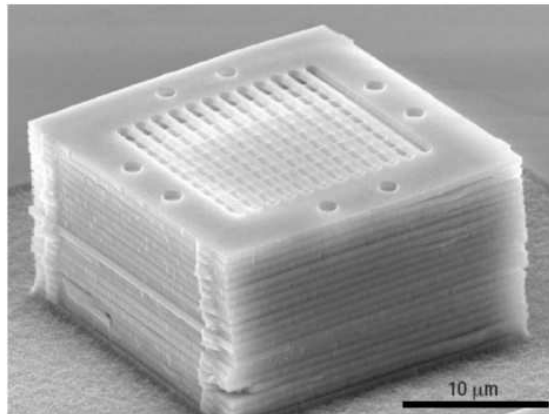


FIG. 5.6 – 3D semi-conducteur cristo-photonique assemblé.

Sans doute que d'autres travaux sur l'utilisation de la vision pour l'automatisation de tâches de micro-assemblage auraient mérités d'être cités et en particulier ceux qui font référence à l'utilisation de l'asservissement visuel.

Les leçons tirées de cette étude sont :

- La commande type look and move est la plus utilisée pour la réalisation de tâches de micromanipulation ou de micro-assemblage. Pour la localisation 3D d'une micropince ou d'un micro-objet dans l'espace de travail, un imageur supplémentaire est ajouté ou des techniques comme le depth-from-focus sont utilisées,
- Du fait que la modélisation d'un microscope photonique pose problème, la majorité des approches de commande référencées capteur de vision ne prennent pas en compte cette modélisation,
- Environ la moitié des stations de micro-assemblage sont équipées d'un système de vision distribué (deux ou plusieurs imageurs). Ces derniers sont disposés de manière à obtenir une vue de dessus et des vues latérales. Par conséquence, l'encombrement des stations est plus volumineux. L'autre moitié est équipée soit de stéréo microscopes (l'information 3D peut être remontée par triangulation), soit des microscopes équipés de plusieurs objectifs de grandissement (pour des vues locales et globales),
- Les stations de micro-assemblage sont souvent distribuées. Elles comportent deux parties : une plateforme de positionnement et un micromanipulateur avec le gripper monté dessus. Donc pour l'automatisation, il faut prévoir des lois de commandes distribuées,
- Le manque de précision des structures mécaniques qui composent les stations de micro-assemblage oblige à utiliser des lois de commande en boucle fermée (retour visuel ou retour d'efforts),
- Les tâches de micro-assemblage les plus étudiées sont de type insertion d'une aiguille dans un trou. Les MEMS les plus aboutis dans le domaine du micro-assemblage (réalisées de manière automatique) sont obtenus par empilement de couches 2D pour aboutir à un MEMS 3D,

- La tolérance d'insertion (jeu mécanique) entre deux éléments dans un assemblage est souvent supérieure à $20\ \mu\text{m}$. Un moyen de fixation est donc souhaitable pour avoir des MEMS solides. La plupart du temps, on fait appel à une fixation externe, au collage (colle ultra-violet (UV), thermique, ...), à la soudure, à un système sophistiqué d'emboîtement (voir figure [FIG. 5.5](#)),
- Le fait que les lois de commande utilisées soient en boucle fermée conduit à un temps de cycle plus important. Comme il a été mentionné au début du manuscrit, le coût d'un MEMS réside essentiellement dans son coût d'assemblage. Afin d'espérer le transfert des approches développées par les laboratoires de recherche dans les milieux industriels, il faut absolument réduire ce temps de cycle.

Une bonne loi de commande d'asservissement visuel a besoin d'un bon algorithme de vision pour extraire les informations visuelles utiles pour boucler la boucle, et ceci de manière robuste, précise et rapide. Ainsi, dans la section suivante, nous présenterons un outil de vision utilisé pour suivre le micro-objet durant les tâches de micromanipulation.

5.5 Algorithme de tracking "ESM"

La composante traitement d'images est essentielle dans une tâche d'asservissement visuel. L'algorithme de traitement d'images doit être capable d'estimer les primitives visuelles, durant l'asservissement visuel, avec robustesse et précision et ceci à la fréquence de l'imageur utilisé. Dans ce cas, on parle d'algorithme de traitement d'images temps-réel. L'objectif est de retrouver les mêmes primitives dans la séquence d'image, c'est-à-dire de les suivre (les tracker). En fonction des primitives visuelles que l'on cherche à suivre, les algorithmes de tracking diffèrent allant du plus simple (suivre des marqueurs dans une image) au plus complexe (formes inconnues). Dans notre cas, nous souhaitons suivre le micro-objet (une région) ayant une forme planaire et ne disposant pas de marqueurs. La tâche de suivi paraît alors complexe. N'étant pas un laboratoire spécialiste de la vision et du traitement d'images, nous avons utilisé la bibliothèque de tracking 2D "ESM" (Efficient Second-order Minimization) développée par Malis et *al.* [\[BM04\]](#), [\[BM07\]](#), [\[SM07\]](#) à l'INRIA Sophia-Antipolis. Comme son nom l'indique, ESM est une méthode basée sur une approximation au deuxième ordre de minimisation d'un critère de similitude entre une image courante et une image de référence. Cette approche est efficace et possède une bonne vitesse de convergence, contrairement aux méthodes du même type comme l'approximation du second ordre de Newton. Cette dernière est rapide mais gourmande en temps de calcul. Dans la littérature, nous trouvons également des méthodes basées sur des approximations au premier ordre comme : la méthode du Gradient, la méthode Gauss-Newton et la méthode Levenberg-Marquandt. Ces méthodes ne sont pas chères en temps de calcul mais leurs convergences restent très discutables.

L'algorithme de tracking "ESM" (dans sa version de base) est destiné à suivre des objets plans. Il se trouve que c'est notre cas, nous voulons suivre des micro-objets en silicium carrés et plans. Donc si on considère, l'imagette du composant comme l'imagette de référence, cette imagette comportera alors un nombre total de n de pixels. Suivre vi-

suellement cette imagette de référence I^* dans l'image courante I consiste à trouver le vecteur x de dimensions (8×1) contenant les paramètres réels de la transformation projective $H(x)$ (dans le cas d'une paramétrisation globale définie partout), ou bien trouver directement la matrice de la transformation projective H (dans le cas d'une paramétrisation locale définie autour de l'identité), qui transforme chaque pixel p_i^* de l'imagette en son correspondant dans l'image courante I , c'est-à-dire, trouver l'homographie H telle que $\forall i \in 1, 2, \dots, q$:

$$I(w(H)(p_i^*)) = I^*(p_i^*) \quad (5.11)$$

Supposons que nous ayons une approximation \hat{x} de x , ou bien une approximation \hat{H} de H , le problème consiste à trouver une transformation incrémentale $H(x)$ telle que la différence entre la région de l'image I transformée par la composition $w(\hat{H}) \circ w(H(x))$ et la région correspondante dans l'image I^* soit nulle. Il s'agit de trouver le vecteur x tel que $\forall i \in 1, 2, \dots, q$, nous ayons :

$$y_i(x) = I(w(\hat{H}) \circ w(H(x))(p_i^*)) - I^*(p_i^*) = 0 \quad (5.12)$$

Si le vecteur des différences d'images est noté $y(x)$ qui sera de dimension $(q \times 1)$. On obtient :

$$y_i(x) = [y_1(x), y_1(x), \dots, y_q(x)]^T \quad (5.13)$$

La résolution du problème revient à trouver $x = \tilde{x}$ qui vérifiera le système suivant :

$$y(\tilde{x}) = 0 \quad (5.14)$$

La solution doit alors vérifier l'égalité suivante :

$$H(\tilde{x}) = \hat{H}^{-1}H \quad (5.15)$$

Pour un bon fonctionnement du tracker ESM, il faut des images suffisamment texturées. Ce n'est malheureusement pas notre cas; rappelons que nous recherchons à suivre des microcomposants en silicium (noir) donc pas vraiment de texture. On peut même aller jusqu'à dire que nous disposons d'images *lisses*, alors l'algorithme ESM rencontre quelques problèmes de convergence pour assurer une certaine robustesse du suivi des micro-objets. Pour améliorer le taux de convergence, nous avons rajouté quelques contraintes sur l'algorithme de tracking, notamment celle de la forme de la fenêtre de suivi. Elle doit constamment avoir la forme de départ (carrée).

5.6 Asservissement visuel 2D multi-échelle

Une loi de commande multi-échelle en asservissement visuel peut s'obtenir de deux manières différentes : soit en utilisant deux imageurs ou plus choisis de manière à avoir à la fois une vue locale et globale de la scène. Dans la littérature traitant cet aspect de multi-échelle, notamment pour la micromanipulation et le micro-assemblage, on peut

citer [WC04], [DWCdS05], [DWCS06], etc, soit en utilisant un seul imageur. Pour cela, le système de vision doit être équipé d'un zoom variable et commandable. L'idée consiste à intégrer le pilotage du zoom dans la loi de commande [HMA95]. Ce qui permet de changer le grandissement de l'imageur (microscope photonique, dans notre cas), c'est-à-dire passer d'une vue globale vers une vue locale ou inversement lors de l'asservissement visuel. Rappelons que le système de vision qui équipe la station de micro-assemblage est également équipé d'un zoom dynamique est proposée dans la prochaine section modélisation d'une commande multi-échelle pour la micromanipulation d'éléments de manière automatique.

5.6.1 Modélisation multi-échelle

Comme il a été mentionné au début du chapitre d'un point de vue général, une loi de commande en asservissement visuel cherche à minimiser l'erreur $\mathbf{e}(t)$ définie par :

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{s}(\mathbf{m}(t)) - \mathbf{s}^* \quad (5.16)$$

Dans notre cas, le vecteur \mathbf{m} regroupe les coordonnées des primitives visuelles représentant les quatre coins de la fenêtre de tracking entourant le micro-objet à manipuler. Les coordonnées de ces quatre points sont notées :

$$\mathbf{s} = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4)^\top \quad (5.17)$$

Les quatre points correspondant à la position désirée \mathbf{s}^* ont pour coordonnées :

$$\mathbf{s}^* = (x_1^* \ x_2^* \ x_3^* \ x_4^* \ y_1^* \ y_2^* \ y_3^* \ y_4^*)^\top \quad (5.18)$$

Ces coordonnées évoluent en fonction du temps t et en fonction du facteur zoom ζ , donc les équations (5.17) et (5.18) deviennent :

$$\mathbf{s} = (x_1(t, \zeta) \ x_2(t, \zeta) \ x_3(t, \zeta) \ x_4(t, \zeta) \ y_1(t, \zeta) \ y_2(t, \zeta) \ y_3(t, \zeta) \ y_4(t, \zeta))^\top \quad (5.19)$$

et les quatre points correspondant à la position désirée sont notés \mathbf{s}^* . Ces points ont pour coordonnées :

$$\mathbf{s}^* = (x_1^*(t, \zeta) \ x_2^*(t, \zeta) \ x_3^*(t, \zeta) \ x_4^*(t, \zeta) \ y_1^*(t, \zeta) \ y_2^*(t, \zeta) \ y_3^*(t, \zeta) \ y_4^*(t, \zeta))^\top \quad (5.20)$$

Il en est de même pour l'équation (5.16) qui devient :

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{s}(\mathbf{m}(t, \zeta)) - \mathbf{s}^*(\zeta) \quad (5.21)$$

Pour élaborer la loi de commande nécessaire, il faut connaître la relation qui relie la variation $\mathbf{s}(\zeta)$ en fonction du temps à la vitesse de la caméra (microscope). Notons la vitesse spatiale de la caméra $\mathbf{v} = (v, \omega)$ avec v représentant la vitesse linéaire instantanée et ω la vitesse angulaire instantanée. Dans le cas d'un robot à 6 ddl, la vitesse de

translation vaut $v = (v_x, v_y, v_z)^\top$ et la vitesse de rotation vaut $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^\top$. Sur la station SAMMI, il n'existe que 5 ddl, donc nous considérons que : $v = (v_x, v_y, v_z)^\top$ et $\omega = (\omega_\theta, \omega_\phi)^\top$. La relation entre les variations de $\dot{\mathbf{s}}$ et \mathbf{v} est donnée par :

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s \mathbf{v} \quad (5.22)$$

où \mathbf{L}_s ($\mathbf{L}_s \in \mathbf{R}^{k \times 6}$) est la matrice d'interaction associée à \mathbf{s} et k représente le nombre de primitives visuelles prises en compte (dans notre cas $k = 4$).

Si nous introduisons les variations de ces primitives en fonction du facteur zoom ζ , l'équation (5.22) devient :

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s(\mathbf{s}, Z^*, \zeta) \mathbf{v} \quad (5.23)$$

où Z^* est la profondeur de la scène désirée calculée par la méthode de depth-from-focus présentée dans le chapitre [4].

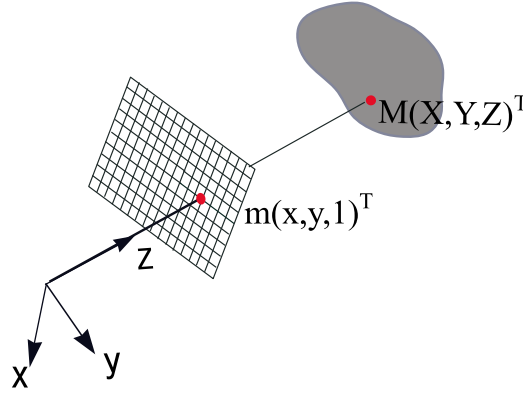


FIG. 5.7 – Modèle d'une caméra.

Soit le repère (O, x, y, z) (FIG. 5.7) dans lequel seront exprimées toutes les grandeurs calculées par la suite, c'est-à-dire les coordonnées des quatre points, le torseur cinématique et la matrice d'interaction associés. Les quatre points du vecteur \mathbf{M} de coordonnées (X, Y, Z) se projettent, par la projection perspective sur le plan image, en \mathbf{m} de coordonnées $(x, y, 1)$ par les équations suivantes :

$$x = X/Z = (u - x_0) / f(\zeta) \quad (5.24)$$

$$y = Y/Z = (v - y_0) / f(\zeta) \quad (5.25)$$

où (x_0, y_0) et $f(\zeta)$ sont les paramètres intrinsèques du microscope optique (ces paramètres sont calculés en utilisant la méthode de calibrage présentée dans le chapitre [3]). Plus précisément, (x_0, y_0) sont les coordonnées du point principal et (u, v) sont les coordonnées du point image \mathbf{m} exprimées en pixels. La distance focale f est fonction des variations du zoom (cette relation est donnée dans le chapitre [3]). Dans [Cha90],

avec différenciation des équations ci-dessus, il est possible d'obtenir aux variations dans l'image, des coordonnées x et y du point M par rapport à la vitesse \mathbf{v} du point \mathbf{e} données par :

$$\mathbf{L}_s = \begin{pmatrix} \mathbf{L}_s(x(k), Z^*, \zeta) \\ \mathbf{L}_s(y(k), Z^*, \zeta) \end{pmatrix} \quad (5.26)$$

avec :

$$\mathbf{L}_s(x(k), Z^*, \zeta) = \begin{pmatrix} \frac{-1}{Z^*} & 0 & \frac{x_1(\zeta)}{Z^*} & x_1(\zeta)y_1(\zeta) & -1 - x_1^2(\zeta) & y_1(\zeta) \\ \frac{-1}{Z^*} & 0 & \frac{x_2(\zeta)}{Z^*} & x_2(\zeta)y_2(\zeta) & -1 - x_2^2(\zeta) & y_2(\zeta) \\ \frac{-1}{Z^*} & 0 & \frac{x_3(\zeta)}{Z^*} & x_2(\zeta)y_3(\zeta) & -1 - x_3^2(\zeta) & y_3(\zeta) \\ \frac{-1}{Z^*} & 0 & \frac{x_4(\zeta)}{Z^*} & x_2(\zeta)y_4(\zeta) & -1 - x_4^2(\zeta) & y_4(\zeta) \end{pmatrix} \quad (5.27)$$

et

$$\mathbf{L}_s(y(k), Z^*, \zeta) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{-1}{Z^*} & \frac{y_1(\zeta)}{Z^*} & 1 + y_1^2(\zeta) & -x_1(\zeta)y_1(\zeta) & -x_1(\zeta) \\ 0 & \frac{-1}{Z^*} & \frac{y_2(\zeta)}{Z^*} & 1 + y_2^2(\zeta) & -x_2(\zeta)y_2(\zeta) & -x_2(\zeta) \\ 0 & \frac{-1}{Z^*} & \frac{y_3(\zeta)}{Z^*} & 1 + y_3^2(\zeta) & -x_3(\zeta)y_3(\zeta) & -x_3(\zeta) \\ 0 & \frac{-1}{Z^*} & \frac{y_4(\zeta)}{Z^*} & 1 + y_4^2(\zeta) & -x_4(\zeta)y_4(\zeta) & -x_4(\zeta) \end{pmatrix} \quad (5.28)$$

Pour une descente exponentielle découplée de l'erreur \mathbf{e} , on écrira :

$$\dot{\mathbf{e}} = \lambda \mathbf{e} \quad (5.29)$$

où λ est un scalaire positif appelé également le gain de l'asservissement.

Finalement, on peut déduire la relation de \mathbf{v} suivante :

$$\mathbf{v} = -\lambda \widehat{\mathbf{L}_s^+} \mathbf{e} \quad (5.30)$$

où $\widehat{\mathbf{L}_s^+}$ est la pseudo inverse de la matrice d'interaction \mathbf{L}_s .

Pour une meilleure convergence de la commande, nous avons pensé à intégrer un gain adaptatif λ_{adp} . En fonction de la distance de la position (position courante) du micro-élément de sa cible (position désirée), la valeur de λ_{adp} change. Il peut prendre la valeur 1 comme valeur initiale, cette valeur diminue exponentiellement pour atteindre la valeur 0.1 à l'approche de la position désirée. Nous pouvons noter alors :

$$\lambda_{adp} = (\lambda_{max} - \lambda_{min}) \exp^{-\rho \|\mathbf{e}\|} + \lambda_{min} \quad (5.31)$$

avec λ_{max} la valeur maximale de λ_{adp} (sa valeur peut être choisie en fonction de nos besoins); λ_{min} représente la valeur minimale à atteindre et le paramètre ρ permet de régler le taux de décroissance de la valeur de λ_{adp} . La courbe montrant l'évolution de λ_{adp} est illustrée sur la figure [FIG. 5.17](#).

Le schéma fonctionnel de la commande multi-échelle proposée ci-dessus est illustré sur la figure [FIG. 5.8](#).

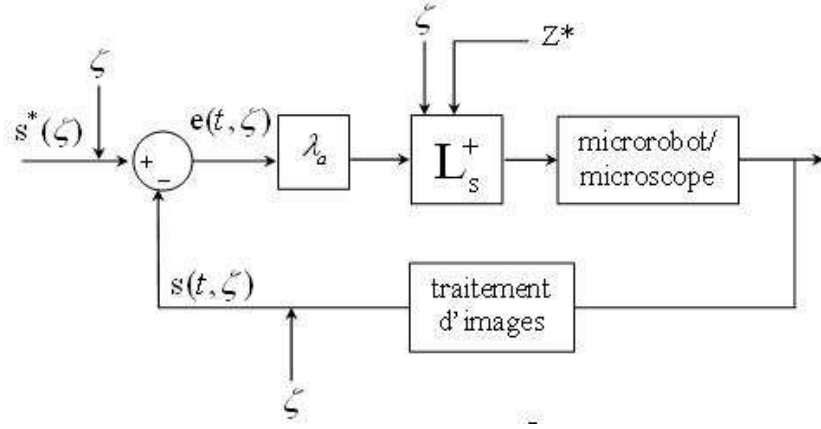


FIG. 5.8 – Schéma bloc de l'asservissement visuel multi-échelle.

5.6.2 Commande en fermeture du gripper

La même méthode de tracking est utilisée pour suivre le doigt supérieur lors de la fermeture du gripper permettant la saisie du composant. À partir de la fenêtre de tracking $W(n \times m)$ où n et m représentent respectivement la longueur et la hauteur de W , nous définissons le point $p_1(u_1, v_1)$ à gauche en bas de cette fenêtre. Ce point sera utilisé pour calculer l'erreur entre les coordonnées de ce point et le point de contact $p_1^*(u_1^*, v_1^*)$ qui se trouve sur la partie supérieure du microcomposant. On notera cette erreur :

$$\mathbf{e}_{g1} = (p_1(t) - p_1^*) \quad (5.32)$$

De même, on note e_{g2} la distance entre la pointe du deuxième doigt du gripper, (point $p_2(u_2, v_2)$) et le point de contact $p_2^*(u_2^*, v_2^*)$ du côté inférieur du microcomposant. Du fait que le micro-objet est parfaitement centré entre les doigts du gripper, l'erreur \mathbf{e}_{g2} est déduite par symétrie :

$$\mathbf{e}_{g2} = -\mathbf{e}_{g1} \quad (5.33)$$

La commande choisie est de type look and move avec un correcteur de type proportionnel. Soient U_{g1} et U_{g2} les commandes associées au deux doigts du gripper. Nous avons alors :

$$U_{g2} = -U_{g1} = -\frac{\mathbf{e}_{g1}}{N} \quad (5.34)$$

avec N un entier.

Cette commande référencée vision (boucle fermée) (FIG. 5.9) est exécutée jusqu'à ce que les points de la micropince soient en contact avec le microcomposant. Une fois ceci réalisé, une commande en boucle ouverte est exécutée pour serrer suffisamment le micro-objet. Sans surprise, la méthode idéale pour la commande du gripper en fermeture serait une commande hybride vision/force ou tout simplement une commande à retour

d'efforts. N'ayant pas de gripper équipé d'un capteur d'effort (pour le moment), nous nous contentons de l'approche proposée ci-dessus.

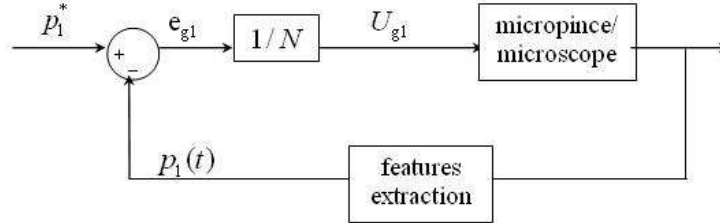


FIG. 5.9 – Schéma de la commande en fermeture de la micropince.

5.7 Partie expérimentale

Comme nous l'avons déjà mentionné, la validation des approches développées a été réalisée sur la station de micromanipulation SAMMI (FIG. 5.10). La figure FIG. 5.11 illustre une vue plus globale de la station où on peut distinguer ainsi la hotte à flux laminaire, la table anti-vibrations ainsi que les deux PC dédiés respectivement aux algorithmes de vision et à la commande. La station SAMMI constitue un réel support de validation pour un bon nombre de travaux de recherche de notre laboratoire.

5.7.1 Configuration de la station SAMMI

- **Structure mécanique :** Du point de vue mécanique, la station comporte cinq degrés de liberté. Les 5 ddl sont distribués en deux parties complètement indépendantes. D'une part, une table de positionnement planaire avec 3 ddl, deux axes de translation x et y et un axe de rotation θ autour de l'axe vertical z . D'autre part, un micromanipulateur à 2 ddl, un axe vertical de translation z et un axe de rotation ϕ monté sur l'axe z avec un angle de 45° . Les caractéristiques de chacun des degrés de liberté sont résumés dans le tableau TAB. 5.1. Le micromanipulateur supporte le gripper dit MMOC (Microprehensile Microrobot On Chip) à 4 ddl. Le positionnement de l'axe ϕ à 45° par rapport à l'axe vertical est choisi de manière à ce qu'à partir d'une position horizontale d'un micro-objet saisi, nous pouvons aboutir à une position verticale du micro-objet avec une rotation de π suivant l'angle ϕ . Ainsi, il est possible de faire des emboitements verticaux de deux micro-objets.

Sur la plateforme de positionnement, un support de micro-objets est monté, voir figure FIG. 5.10.(c). La particularité de ce support c'est qu'il est compliant (flexible). Il est maintenu par trois ressorts montés à 120° l'un de l'autre. Bien évidemment, la présence du support compliant offre une certaine sécurité pour le système de grippage. Il permet, d'une part de ne pas casser la micropince lors des mouvements sur z et d'autre part, de faire des assemblages plus serrés toujours en gardant une certaine sécurité sur

la micropince.

axes de translation (xyz)	
résolution	$0.007 \mu\text{m}$
incrémentation	$0.05 \mu\text{m}$
vitesse maximale	1.5 mm/s
course maximale	25 mm
axes de rotation ($\theta\phi$)	
résolution	$26 \mu\text{rad}$
incrémentation	$26 \mu \text{ rad}$
vitesse maximale	45 deg/s

TAB. 5.1 – Spécifications des axes de translation et de rotation.

- **Modèle géométrique de la station SAMMI :** Le modèle géométrique direct (MGD) d'une structure robotique, permet de donner la configuration (position, orientation) de l'effecteur du robot en fonction de la configuration de ces articulations (liaisons). Sur la station SAMMI, la modélisation a été effectuée séparément : un modèle MGD1 pour la plateforme $xy\theta$ et un modèle MGD2 pour le micromanipulateur $z\phi$. Ils sont donnés respectivement par les équations (5.35) et (5.37)

$$\mathbf{J}_1 = \begin{pmatrix} \cos q_3 & \sin q_3 & 0 & q_1 \\ -\sin q_3 & \cos q_3 & 0 & q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.35)$$

avec q_1 , q_2 et q_3 les coordonnées articulaires de la plateforme de positionnement ($xy\theta$). La représentation des coordonnées articulaires en fonction des coordonnées cartésiennes est donnée par le MGI1 (modèle géométrique inverse) :

$$(q_1, q_2, q_3) = \mathbf{J}_1^+(x, y, \theta)^\top \quad (5.36)$$

Pour ce qui concerne le micromanipulateur :

$$\mathbf{J}_2 = \begin{pmatrix} a \cos q_5 & -a \sin q_5 & a & 0 \\ -\sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ -a \cos q_5 & a \sin q_5 & a & q_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.37)$$

avec q_4 et q_5 les coordonnées articulaires du micromanipulateur ($z\phi$). La représentation des coordonnées articulaires en fonction des coordonnées cartésiennes est donnée par le MGI2 (5.38) et $a = \cos(\pi/4) = \sin(\pi/4)$ qui indique l'angle entre l'axe de translation vertical z et l'axe de rotation ϕ .

$$(q_4, q_5) = \mathbf{J}_2^+(z, \phi)^\top \quad (5.38)$$

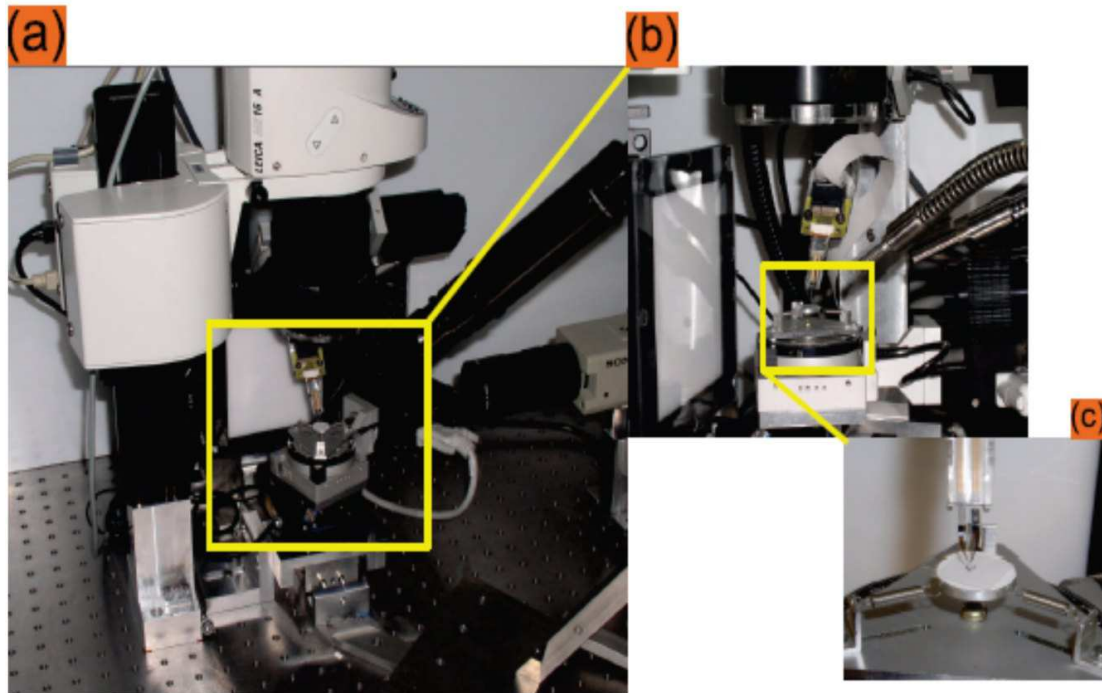


FIG. 5.10 – Station de micro-assemblage SAMMI.

- **Système de préhension** : Le système de préhension s'appelle le MMOC. Il a été développé au sein de notre laboratoire [ANC05], voir figure FIG. 5.10.(c). Le MMOC possède 4 ddl (2 ddl par doigt). Il permet deux mouvements planaires $y+$ et $y-$ pour la saisie et le lâché de micro-objets et deux autres mouvements hors plan $z+$ et $z-$ pour contrôler l'alignement des doigts. Ces deux derniers permettent également d'orienter le micro-objet dans l'espace après saisie. Le principe d'actionnement du MMOC est de type piézo-électrique, à chaque ddl est associé un actionneur piézo-électrique. Pour ce qui concerne les spécifications, vous pouvez vous référer au tableau TAB. 5.2. Un autre point fort du système de gripping MMOC, c'est la possibilité d'adapter les organes terminaux en fonction des besoins. Par exemple, il existe des prototypes pour la manipulation de microbilles, de micro-objets plans, cylindriques, etc. En fonction de la taille des micro-objets à manipuler, les organes terminaux peuvent être également adaptés, des doigts plus souples en silicium pour les objets d'une dizaine de micromètres et des doigts en nickel, plus rigides, pour les objets de quelques centaines de micromètres. Pour le micro-assemblage, notamment les travaux qui seront présentés dans le chapitre [6], nous avons opté pour des organes terminaux en nickel car ils possèdent une force de blocage suffisamment importante pour aboutir à des assemblages plus serrés (solides).

- **Microstructures** : La difficulté à trouver des MEMS dans le commerce pour valider les concepts développés, nous a amené à penser nous-même ces microstructures. Un panel de micro-objets a été réalisé par microfabrication par des procédés de gravure sur des



FIG. 5.11 – Photographie plus large de la station SAMMI.

courses types	
ouverture-fermeture	320 μm
montée-descente	200 μm
forces de blocage	
ouverture-fermeture	55 mN
montée-descente	10 mN
autres caractéristiques	
grande résolution	$\sim 10 \text{ nm}$
vitesse	$\prec 10 \text{ ms}$

TAB. 5.2 – Spécifications des organes terminaux en nickel.

wafers en silicium. Sur la figure FIG. 5.12, sont montrés des exemples de micro-objets réalisés avec différentes formes et tailles.

- **Système de vision** : Deux systèmes de vision équipent la station SAMMI. Un stéréo microscope photonique de type Leica MZ16A pour la vue de dessus (il a fait l'objet de

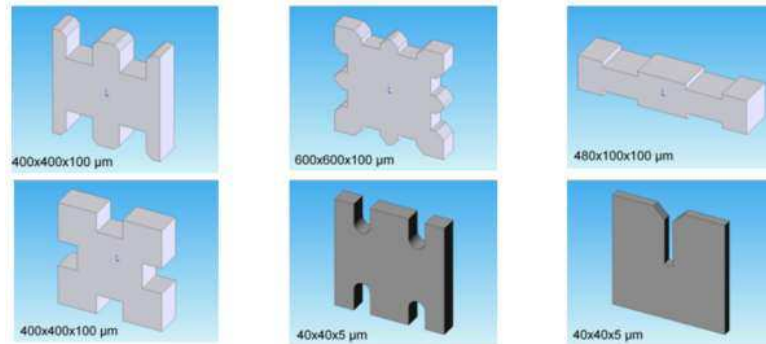


FIG. 5.12 – Exemples de microstructures.

l'étude et la validation de la méthodologie de calibrage présentée dans le chapitre [3]) et une caméra monochrome Allied de type CCD de chez Marlin, associée à un adaptateur et un objectif à fort grandissement, pour une vue plongée de la scène. Dans ce chapitre nous nous intéressons seulement au stéréomicroscope pour la validation des travaux sur la micromanipulation par asservissement visuel 2D multi-échelle. L'autre système de vision sera décrit dans le chapitre [6] dédié au micro-assemblage de MEMS par asservissement visuel 3D. Nous travaillons avec la vue de dessus à une fréquence de 11 images/seconde. Étant donné que le zoom du microscope est motorisé et commandable par ordinateur, ceci nous a évité d'avoir à utiliser des systèmes multi-imageurs pour des vues locales et globales de la scène. Pour ce qui est de l'éclairage, une source d'illumination en forme de bague est placée autour de l'objectif pour un éclairage direct de la table de positionnement. Le dispositif possède un réglage de la puissance de la lumière émise pour avoir une scène de travail éclairée de la manière la plus homogène possible.

- Table anti-vibrations et hotte à flux laminaire : En micromanipulation, les vibrations posent énormément de problèmes. Rien que de la présence de personnes autour de la station de micro-assemblage engendre des vibrations avec seulement des mouvements très simples (plissement des genoux, par exemple) ou un claquement de porte. À cet effet, une table anti-vibrations est plus que nécessaire. L'ensemble des éléments décrits ci-dessus est donc placé sur une table anti-vibrations pour amortir au mieux ces vibrations. Il reste le problème des particules de poussière ou autres qui viennent se déposer sur la station de jour en jour. Ces particules peuvent avoir une taille supérieure à celle des micro-objets manipulés. Il a été jugé indispensable de protéger l'espace de travail en plaçant toute la station à l'intérieur d'une hotte à flux laminaire. Il est bien évidemment plus judicieux de travailler dans une salle blanche mais ce genre de structure est hors de prix.

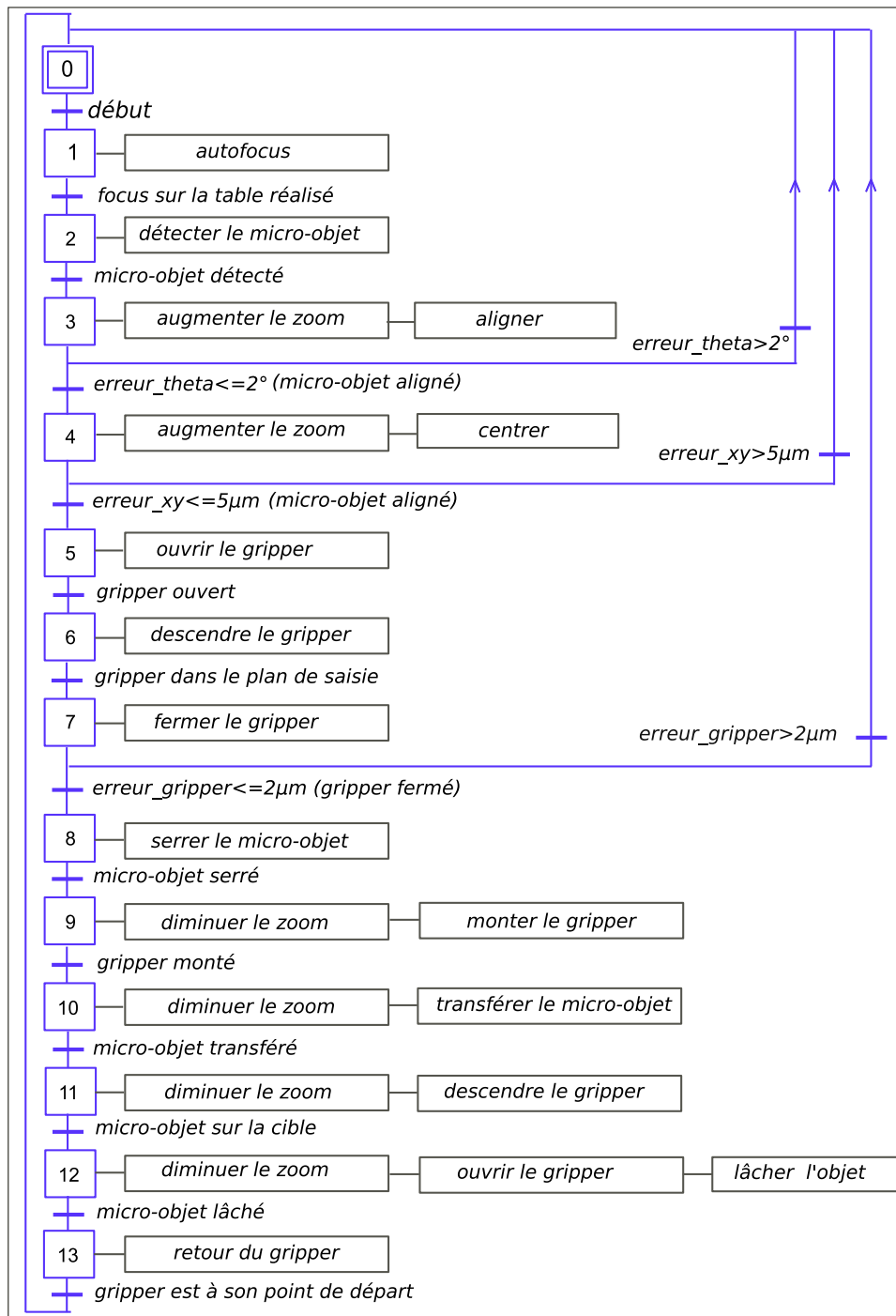
Deux ordinateurs équipent notre station. Le premier est entièrement dédié aux algorithmes de vision et au pilotage du microscope optique Leica, tandis que le deuxième est réservé à la commande et aux communications avec les différents moteurs. Le PC de

vision est un Pentium (R) D avec une CPU à 2.80 G Hz et équipé de 2 Go de RAM et le PC de commande est un Pentium (R) D avec une CPU à 3.00 G Hz et 1 Go de RAM.

5.7.2 Cycle de pick and place automatisé

La validation des travaux développés et décrits dans ce chapitre se fait à travers un cycle de micromanipulation. À cette occasion, un cycle de pick and place d'un micro-objet en silicium de taille $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ est implémenté. Le cycle en lui même est décomposé en plusieurs sous-tâches regroupées dans le *grafcet* de la figure [FIG. 5.13](#). Les sous-tâches sont expliquées ci-dessous.

- **sous-tâche 1** : autofocus. Il permet de scanner la scène pour se focaliser ensuite sur la table de positionnement, donc sur le micro-objet.
- **sous-tâche 2** : détection du micro-objet à manipuler. Par hypothèse, les micro-objets arrivent par un système de feeding sous différentes orientations et sont posés à plat. Le micro-objet le plus proche du gripper dans l'image est celui qui sera choisi. Une fois le micro-objet détecté, il sera suivi (tracké) dans l'image.
- **sous-tâche 3** : alignement du micro-objet parallèlement aux axes de l'image et le pilotage du zoom (augmentation). Accroître le grandissement permet d'avoir une meilleure résolution de l'image, donc une meilleure précision.
- **sous-tâche 4** : centrage du micro-objet entre les doigts de la micropince et pilotage du zoom (augmentation). Diminuer le grandissement du microscope permet un champ de vision plus large, notamment au début et à la fin du cycle de micromanipulation.
- **sous-tâche 5** : ouverture maximale du système de gripping (commande en boucle ouverte).
- **sous-tâche 6** : descente du gripper. La commande du micromanipulateur suivant l'axe vertical z est définie par la méthode de depth-from-focus décrite dans le chapitre [\[4\]](#).
- **sous-tâche 7** : fermeture des de la micropince (commande en boucle fermée de type look and move). La position finale du micro-objet est définie de telle sorte que le micro-objet se retrouve parfaitement centré entre les doigts. De ce fait, seulement un des doigts de la pince est tracké donc commandé. La commande associée au deuxième doigt est déduite par symétrie par rapport à un point situé à mi-distance entre les pointes des deux doigts. Le principe de la commande repose sur la régulation à zéro des erreurs e_1 et e_2 respectivement entre $p_1(x, y)$ (pointe du premier doigt) et $p_1^*(x^*, y^*)$ (premier point de contact sur le micro-objet) et entre $p_2(x, y)$ (pointe du second doigt) et $p_2^*(x^*, y^*)$ (second point de contact sur le micro-objet), voir figure [FIG. 4.1](#). Le choix de la boucle fermée s'explique par la présence de deux phénomènes au niveau du comportement du système de gripping (rappelons le, c'est un actionnement piézoélectrique) qui sont la présence d'un

FIG. 5.13 – Cycle de pick and place automatisé présenté sous forme d'un *Grafset*.

hystérésis et d'une dérive⁵. Avoir un contrôle du comportement du gripper lors de la commande permet de mieux contrôler la saisie des objets.

- **sous-tâche 8** : serrage du micro-objet (boucle ouverte). Une commande sur un retour d'effort au niveau des doigts, lors du serrage, serait la solution idéale. En l'absence de ce capteur, le serrage du micro-objet est assuré en boucle ouverte par envoi d'une suite d'échelons sur les actionneurs (préalablement testés et validés en mode télé-opéré).
- **sous-tâche 9** : élévation du gripper avec le micro-objet et le pilotage du zoom (diminution) pour avoir une vue globale de la scène. Une vitesse suffisamment élevée doit être appliquée au gripper pour pouvoir décoller le micro-objet de son support. La présence de forces de Wan der Waals est importante lorsque le micro-objet est directement posé sur le support. Dans certains cas, les micro-objets sont posés sur une surface adhérente pour faciliter ensuite leur lâché et éviter qu'ils restent collés aux doigts de la micropince. Dans ce cas, décoller le micro-objet de cette surface adhérente est d'autant plus compliqué, d'où la nécessité d'appliquer une certaine accélération au gripper pour arracher le micro-objet.
- **sous-tâche 10** : transfert du micro-objet vers la cible et le pilotage du zoom (diminution) pour avoir une vue globale de la scène. En fonction des nos besoins, soit en effectuant une rotation de 180 ° suivant l'angle ϕ pour le poser *debout* sur la cible en vue d'une prochaine phase d'assemblage, sinon en le posant parfaitement à plat sur la cible, dans ce cas pas de rotation autour de ϕ . Le lâché est une étape très décisive. Les effets d'adhésion entre le micro-objet et les doigts posent énormément de problèmes, c'est d'ailleurs le verrou de la micromanipulation.
- **sous-tâche 11** : descente du gripper vers la position désirée pour poser le micro-objet et le pilotage du zoom (diminution) pour avoir une vue globale de la scène.
- **sous-tâche 12** : ouverture des doigts de la micropince pour relâcher le micro-objet sur sa position désirée et le pilotage du zoom (diminution).
- **sous-tâche 13** : retour à la position initiale. Une fois que le cycle est fini, le gripper retourne à sa position initiale ainsi que la table de positionnement.

La figure [FIG. 5.14](#) illustre quelques images d'une séquence d'images prise durant le cycle de pick and place réalisé. L'image [5.14.\(a\)](#) montre le début du cycle (position aléatoire du micro-objet et grandissement faible) ; les images [5.14.\(a\),\(b\)](#) montrent respectivement une position intermédiaire et une position finale du positionnement de l'objet entre les doigts de la micropince (grandissement fort) ; les images [5.14.\(d\),\(e\)](#) illustrent respectivement le début et la fin du tracking du doigt supérieur du gripper (commande en fermeture) et l'image [5.14.\(f\)](#) montre le micro-objet parfaitement saisie et prêt à être transférer vers sa cible.

Si nous analysons de plus près la fin de la partie positionnement de l'objet à la position désirée (entre les doigts de la pince), nous remarquons qu'une précision sub-pixellique est obtenue (voir figure [FIG. 5.15](#)). Dans le cahier des charges établi au départ, il a été

⁵creep, de l'anglais.

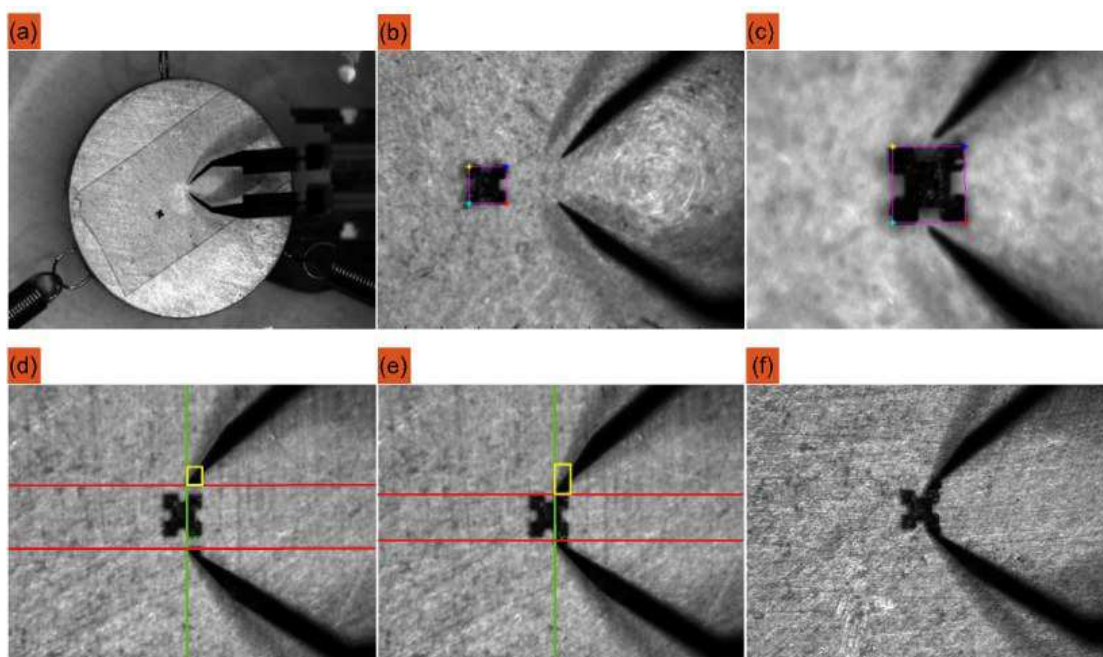


FIG. 5.14 – Séquence d’images prise sur un cycle de pick and place d’un micro-objet en silicium.

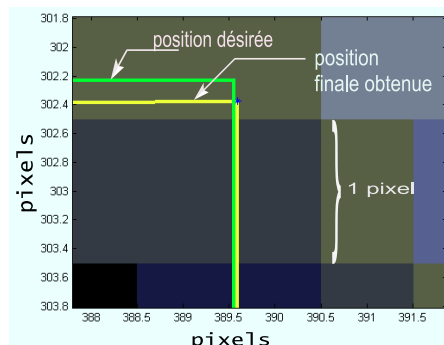


FIG. 5.15 – Illustration de la précision sub-pixellique lors d’un positionnement.

mentionné qu’une précision de l’ordre de $1\ \mu\text{m}$ pour la translation et 0.5° pour l’orientation étaient souhaitables. Alors, ces résultats obtenus peuvent être considérés comme satisfaisants.

La figure FIG. 5.15.(a) montre le début de la tâche de fermeture des doigts de la pince par une commande référencée vision et la figure FIG. 5.15.(b) illustre un zoom sur la fenêtre de tracking et le point de contact se trouvant sur le côté supérieur du micro-objet. Comme il a été dit, le deuxième doigt (doigt inférieur) est contrôlé par symétrie

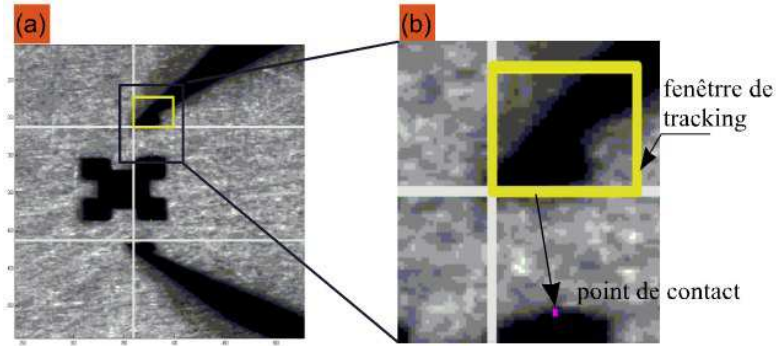
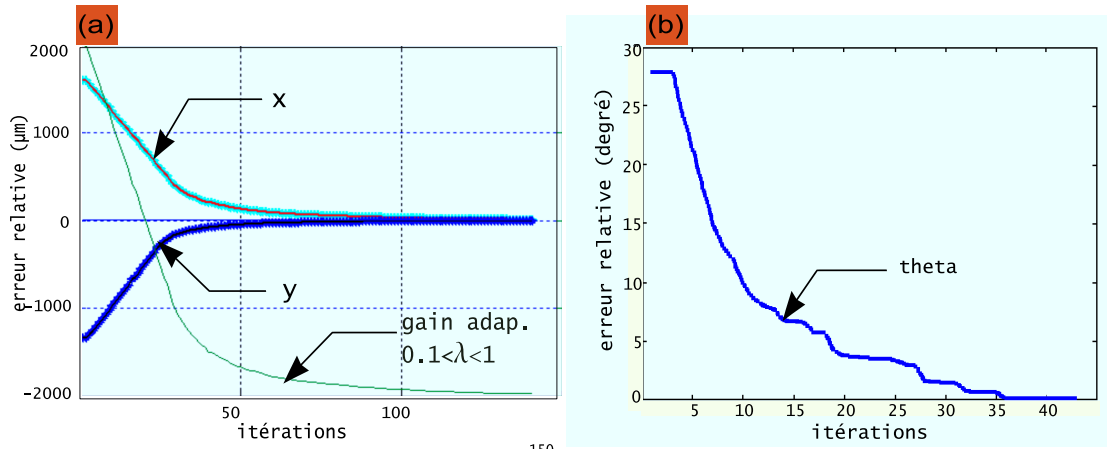


FIG. 5.16 – Commande en fermeture de la micropince par retour visuel.

du premier doigt (doigt supérieur).

FIG. 5.17 – Évolution des erreurs e_x , e_y et e_θ lors du positionnement d'un micro-objet à une position désirée.

Sur la figure FIG. 5.17.(a), est illustrée l'évolution des erreurs e_x et e_y , sur les 2 ddl de translation qui équipent la table de positionnement, en fonction du nombre d'itérations i . Toujours sur la même figure, la troisième courbe (en vert) montre l'évolution (sous forme exponentielle) du gain adaptatif λ_{adp} en fonction de l'erreur moyenne $(e_x + e_y + e_\theta)/3$. Le λ_{adp} prend ses valeurs dans l'intervalle $[1 \rightarrow 0.1]$. La figure FIG. 5.17.(b) montre l'évolution, sous forme exponentielle, de l'erreur e_θ en fonction du nombre d'itérations i .

Les figures FIG. 5.18.(a) et 5.18.(b) représentent respectivement l'évolution de l'erreur e_1 entre la point du doigt supérieur p_1 et le point de contact supérieur p_1^* et l'erreur e_2 entre la pointe du doigt inférieur p_2 et le point de contact inférieur p_2^* .

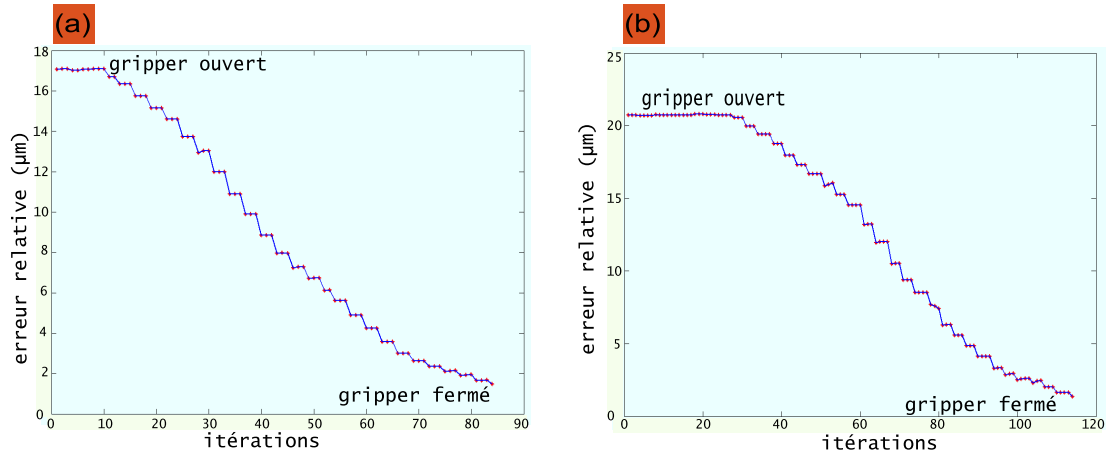


FIG. 5.18 – Évolution des erreurs e_1 et e_2 lors de la fermeture des doigts de la pince.

5.8 Étude et analyse des résultats obtenus

Nous rappelons que les hypothèses posées au départ sont que les micro-éléments à manipuler arrivent par un système de feeding sur la station de micromanipulation sous différentes orientations et positions. Ainsi, nous avons recommencé à maintes reprises le cycle de pick and place implémenté dans le but de tester sa validité. Le tableau TAB. 5.3 regroupe quelques scénarios types rencontrés pendant la validation. Les raisons des échecs rencontrés vont être étudiées afin de proposer des solutions pour améliorer le taux de succès. Le taux de succès est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$\text{taux de succès} = \frac{\text{cycles réussis}}{\text{nombre de cycles}} \quad (5.39)$$

Le taux de réussite obtenu est 72 % pour l'ensemble des cycles effectués contre 28 % pour les échecs. Nous tenterons, par la suite, de comprendre les raisons des échecs pour apporter des solutions matérielles ou logicielles aux approches présentées dans ce chapitre.

Sur le tableau TAB. 5.3 sont résumés cinq types de causes d'échec. L'occultation importante (plus de 1/4) du micro-élément sous les doigts de la pince lors du positionnement représente 17 % des échecs (cas n° 5 du tableau) ; les occultations partielles n'affectent pas la réussite du cycle (cas n° 3 du tableau). Les effets d'adhésion (le micro-objet reste collé aux doigts du gripper) sont responsables de 24 % des échecs (cas n° 7 du tableau). En ce qui concerne les effets électrostatiques (si le micro-objet et les doigts de la pince ont des charges négatives sur leurs surfaces, le micro-objet sera repoussé et inversement dans le cas de charges différentes, le micro-objet se trouve projeté vers un des doigts) ils ont causé 37 % de l'ensemble des échecs. Ils restent 22 % des échecs qui sont dus à l'échec de la commande. La commande est jugée en échec lorsque, la précision du positionnement dépasse 5 μm en translation et 2 ° en rotation. Pour les cycles de

N°	tâche	position initiale	précision	note	résultat
1	alignement (θ)	14 °	0.09 °		succès
	centrage (x, y)	1029 μm	0.43 μm		succès
	fermeture (e_1)	163 μm	1.72 μm		succès
	montée	↗	↗		succès
	transfert	↗	↗		succès
	lâcher	↗	↗		succès
2	alignement (θ)	32 °	0.61 °	dépassement	succès
	centrage (x, y)	1015 μm	4.91 μm		succès
	fermeture (e_1)	163 μm	1.77 μm		succès
	montée	↗	↗		succès
	transfert	↗	↗		succès
	lâché	↗	↗		succès
3	alignement (θ)	21 °	0.27 °	occultation	succès
	centrage (x, y)	1321.5 μm	0.77 μm		succès
	fermeture (e_1)	163 μm	1.44 μm		succès
	montée	↗	↗		succès
	transfert	↗	↗		succès
	lâché	↗	↗		succès
4	alignement (θ)	7.53 °	0.68 °		succès
	centrage (x, y)	992.5 μm	6.16 μm		échec
	fermeture (e_1)	×	×		échec
	montée	×	×		échec
	transfert	×	×		échec
	lâché	×	×		échec
5	alignement (θ)	33.8 °	×	occultation	échec
	centrage (x, y)	1.75 μm	×		échec
	fermeture (e_1)	163 μm	×		échec
	montée	×	×		échec
	transfert	×	×		échec
	lâché	×	×		échec
6	alignement (θ)	13 °	0.24 °	effet électrostatique	succès
	centrage (x, y)	560.7 μm	0.86 μm		succès
	fermeture (e_1)	163 μm	×		échec
	montée	×	×		échec
	transfert	×	×		échec
	lâché	×	×		échec
7	alignement (θ)	15.5 °	0.52 °	effet d'adhésion	succès
	centrage (x, y)	348.2 μm	0.64 μm		succès
	fermeture (e_1)	163 μm	1.11 μm		succès
	montée	↗	↗		succès
	transfert	↗	↗		succès
	lâché	×	×		échec

TAB. 5.3 – Résultats choisis pour représenter les différents scénarios rencontrés lors de la validation.

tâche	erreur moyenne	écart type
alignement(θ)	0.37 °	0.31 °
positionnement(x, y)	1.87 μm	1.61 μm
fermeture(e_1)	1.36 μm	0.34 μm

TAB. 5.4 – Résumé des résultats en précision

pick and place validés, un tableau résumant l'erreur moyenne et l'écart type de l'erreur respectivement des tâches alignement, positionnement et fermeture sont dressés dans le tableau TAB. 5.4.

La section suivante sera consacrée donc à l'amélioration du taux de réussite en traitant quelques problèmes qui ont conduit à l'échec des cycles de micromanipulation.

5.9 Améliorations à apporter

Certes, le taux de réussite souhaité est de 100 % sur les cycles de micromanipulation mais ceci reste un objectif difficile à atteindre, notamment au niveau des échecs dont la responsabilité est liée aux phénomènes physiques du micromonde. Traiter les problèmes liés aux forces surfaciques ne relevant pas de nos compétences, nous avons choisi de travailler davantage sur la minimisation des échecs dûs aux occultations des micro-objets sous les doigts du gripper. Pour ce faire, une approche par planification et suivi de trajectoire a été implémentée et validée expérimentalement. Ces travaux font l'objet de la suite de ce chapitre. Pour les effets statiques, le fait de connecter le gripper à la masse a visiblement diminué les effets électrostatiques entre les doigts de la pince et les micro-objets lors de la saisie. Ceci reste à étudier plus finement.

5.10 Planification de trajectoire

Plusieurs méthodes de planification de trajectoire existent dans le domaine de la robotique mobile [PV02], [MLL08]. Dans ce manuscrit, nous avons choisi d'adapter la méthode des champs potentiels pour planifier la trajectoire des micro-éléments lors de la manipulation (FIG. 5.19), ceci afin de supprimer les problèmes liés aux occultations qui sont responsables, rappelons le, de 24 % des échecs. Les champs potentiels sont répartis de la manière suivante : la position désirée du micro-objet dans l'image se trouve entre les doigts du gripper, cette position, il est considéré comme étant le centre du champ potentiel attractif. Les pixels-contours du gripper, dans l'image, sont les centres des champs potentiels répulsifs capables d'empêcher le micro-élément de passer sous le gripper. Quant au micro-objet (une bille en métal de 200 μm de diamètre) est considérée comme une particule de l'espace de configuration \mathbb{Q} . Cette particule est donc soumise aux champs potentiels artificiels $U(q(x, y, t))$ où $q(x, y, t)$ est la position de la microbille

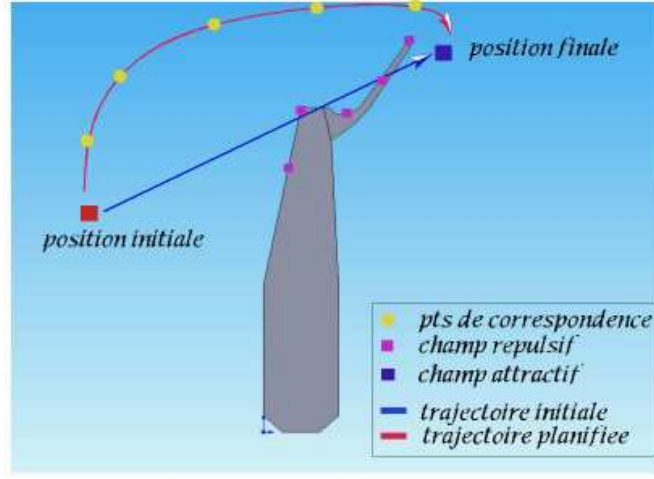


FIG. 5.19 – Illustration de la planification de trajectoire.

à l'instant t . La direction de la microbille entre la position initiale et la position désirée est guidée par la force artificielle $F(q(x, y, t))$ donnée par la relation suivante :

$$F(q(x, y, t)) = -\nabla U(q(x, y, t)) \quad (5.40)$$

avec $U(q(x, y, t))$ qui est défini par la somme du champ attractif U_{att} guidant le micro-objet vers la position désirée et le champ répulsif U_{rep} qui essaye de maintenir l'objet éloigné du gripper.

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q) \quad (5.41)$$

Le champ attractif peut être simplement défini sous forme parabolique :

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2}\xi\rho_{goal}^2(q) \quad (5.42)$$

avec ξ un scalaire positif, ρ_{goal} la distance euclidienne $\|q - q_{goal}\|$, (q_{goal} représente la position désirée). La fonction $U_{att}(q)$ est donc positive ou nulle et atteint son minimum à q_{goal} , où $U_{att}(q_{goal}) = 0$.

Le champ répulsif doit servir donc de barrière de potentiel autour des pixels-obstacles (contours des doigts du gripper, dans notre cas). Ce champ potentiel artificiel doit affecter le mouvement de la microbille quand elle s'approche du gripper mais ne doit en aucun cas affecté son mouvement quand elle est loin du gripper. Le champ potentiel est régi par les formules suivantes :

$$U_{rep}(q) = \frac{1}{2}\eta \left(\frac{1}{\rho_{obs}(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \quad si \quad \rho_{obs}(q) < \rho_0 \quad (5.43)$$

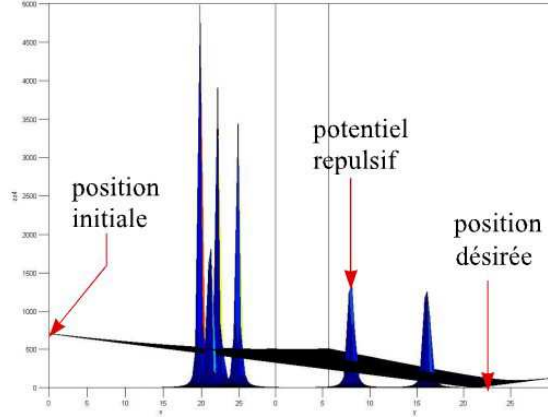


FIG. 5.20 – Illustration des champs de potentiels simulés.

$$U_{rep}(q) = 0 \quad si \quad \rho_{obs}(q) \geq \rho_0 \quad (5.44)$$

où :

- η est un scalaire positif,
- ρ_0 est un scalaire positif appelé distance d'influence des pixels-obstacles obs ,
- ρ_{obs} est la distance euclidienne $\|q - q_{obs}\|$ (q_{obs} est la position d'un obstacle).

La fonction U_{rep} est positive ou nulle et tend vers ∞ quand la microbille approche les frontières des pixels-obstacles.

On a alors :

$$F_{rep} = -\nabla U_{rep} \quad (5.45)$$

$$F_{rep} = \eta \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2(q)} \nabla \rho(q) \quad si \quad \rho(q) < \rho_0 \quad (5.46)$$

$$F_{rep} = 0, \quad sinon \quad (5.47)$$

Un exemple d'une simulation des champs potentiels artificiels est illustré sur la figure FIG. 5.20.

Une fois les potentiels définis, il reste à trouver le chemin que la microbille doit prendre pour aller de la position initiale à la position finale sans risquer de passer sous les doigts de la micropince. Nous avons opté pour la technique de la descente du gradient pour aller vers cette position désirée. Cette technique consiste tout simplement à suivre la direction indiquée par la force $F(q(x, y, t))$ et à avancer dans cette direction d'un pas de longueur δ_i .

$$x(q_{i+1}) = x(q_i) + \delta_i \frac{\partial U}{\partial x(x, y)} \quad (5.48)$$

$$y(q_{i+1}) = y(q_i) + \delta_i \frac{\partial U}{\partial y(x, y)} \quad (5.49)$$

5.10.1 Paramétrisation de la courbe par un polynôme Bézier

À partir des points définis (que nous appelons points de correspondance) par la planification de trajectoire, une interpolation avec les courbes de Bézier a été implémentée. Nous obtenons alors une courbe paramétrée entre la position initiale et la position finale de la microbille. C'est cette courbe qui sera utilisée pour le suivi de trajectoire par asservissement visuel 2D.

Soient $[p_1, p_2, \dots, p_n]$ les dits points de correspondance et x_i, y_i leurs coordonnées cartésiennes dans le repère image. Les paramètres de la nouvelle courbe obtenue par la méthode de Bézier auront pour coordonnées X et Y données par :

$$X = \sum_{i=0}^{i=n} B_n^i(t) x_i \quad (5.50)$$

et

$$Y = \sum_{i=0}^{i=n} B_n^i(t) y_i \quad (5.51)$$

avec $B_n^i(t)$ est appelé polynôme de Bernstein de degré n , $t^0 = 1$ et $(1-t)^0 = 1$, $t \in [0, 1]$. Le polynôme est obtenu par les relations suivantes :

$$B_n^i(t) = C_n^i (1-t)^{n-1} t^i \quad (5.52)$$

où C_n^i correspond à :

$$C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (5.53)$$

La validation de ces approches est faite à travers la manipulation de billes micrométriques. La section suivante est consacrée à ces travaux.

5.10.2 Application à la manipulation de microbilles

Comme la régulation des signaux dans l'image n'est pas la seule cause du mouvement caméra/objet. On peut comme dans le cas présenté ci-dessus (suivi de trajectoire), où la cible suit simultanément la trajectoire planifiée pendant la commande. Dans ce cas, la matrice d'interaction comportera deux termes : un terme de régulation et un terme de trainage. La fonction de tâche s'écrit :

$$\mathbf{e}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{C}(\mathbf{s}(r, t) - \mathbf{s}^*(t)) \quad (5.54)$$

avec le terme $\mathbf{s}^*(t)$ représentant la position désirée qui évolue dans le temps suivant la trajectoire planifiée. Les informations visuelles choisies sont les coordonnées des coins du rectangle englobant la microbille.

Comme dans le cas de la loi de commande multi-échelle, nous choisissons une régulation à zéro sous forme exponentielle de l'erreur \mathbf{e} .

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e}(\mathbf{r}, t) \quad (5.55)$$

Nous considérons le schéma de commande suivant :

$$\mathbf{v} = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}^+ (\mathbf{s}(r, t) - \mathbf{s}^*(t)) + \widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}^+ \frac{\partial \mathbf{s}^*(t)}{\partial t} \quad (5.56)$$

où $-\lambda \widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}^+ (\mathbf{s}(r, t) - \mathbf{s}^*(t))$ représente la partie régulation de la loi de commande et $\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}}^+ \partial \mathbf{s}^*(t)/\partial t$ la partie correspondante au suivi de trajectoire (traînage).

La matrice d'interaction $\mathbf{L}_{\mathbf{s}}$ associée aux quatre primitives visuelles (points) choisies est donnée par :

$$\mathbf{L}_{\mathbf{s}}(x(k), z) = \begin{pmatrix} \frac{-1}{Z} & 0 & \frac{x_1}{Z} & x_1 y_1 & -1 - x_1^2 & y_1 \\ \frac{-1}{Z} & 0 & \frac{x_2}{Z} & x_2 y_2 & -1 - x_2^2 & y_2 \\ \frac{-1}{Z} & 0 & \frac{x_3}{Z} & x_3 y_3 & -1 - x_3^2 & y_3 \\ \frac{-1}{Z} & 0 & \frac{x_4}{Z} & x_4 y_4 & -1 - x_4^2 & y_4 \end{pmatrix} \quad (5.57)$$

$$\mathbf{L}_{\mathbf{s}}(y(k), Z) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{-1}{Z} & \frac{y_1}{Z} & 1 + y_1^2 & -x_1 y_1 & -x_1 \\ 0 & \frac{-1}{Z} & \frac{y_2}{Z} & 1 + y_2^2 & -x_2 y_2 & -x_2 \\ 0 & \frac{-1}{Z} & \frac{y_3}{Z} & 1 + y_3^2 & -x_3 y_3 & -x_3 \\ 0 & \frac{-1}{Z} & \frac{y_4}{Z} & 1 + y_4^2 & -x_4 y_4 & -x_4 \end{pmatrix} \quad (5.58)$$

Sur la partie présentée ci-dessus, il est uniquement question de la commande de la plateforme de positionnement à 3 ddl ($x y \theta$), donc le torseur de vitesse est :

$$\mathbf{v} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}) \quad (5.59)$$

Sur la partie suivi de trajectoire, les \mathbf{s}^* peuvent varier en fonction d'un pas de déplacement Δ fixé au préalable. Plus Δ est grand, plus la convergence vers la position désirée est rapide, ceci au détriment de la qualité du suivi, c'est-à-dire la microbille a du mal à suivre la trajectoire sur les parties de la trajectoire à fort courbure. Par ailleurs, si nous choisissons un suivi plus précis, il faut diminuer le Δ , ce qui posera un problème sur le temps de convergence de la commande vers la position finale désirée.

5.10.3 Résultats expérimentaux

La figure FIG. 5.21 montre les différents résultats de planification et de suivi de trajectoire obtenus avec les approches décrites ci-dessus. Nous remarquons bien que la bille dans aucun des essais ne passe sous les doigts du gripper. Le suivi de trajectoire fonctionne de la manière suivante, la position finale appelée intermédiaire P_{int} est positionnée à une distance Δ de la position initiale P_{ini} de la microbille (position se trouvant sur la courbe de Bézier). La microbille cherche donc à atteindre P_{int} , dès qu'elle s'approche à un seuil donné S , la position intermédiaire se déplace d'un pas Δ sur la courbe. Cela va se répéter jusqu'à ce que la distance entre la position désirée P_{des} et la dernière position désirée soit inférieure à Δ . Dans ce cas, il n'y a plus de suivi de trajectoire, la microbille va essayer d'aller directement vers P_{des} . Cela peut être représenté par une succession

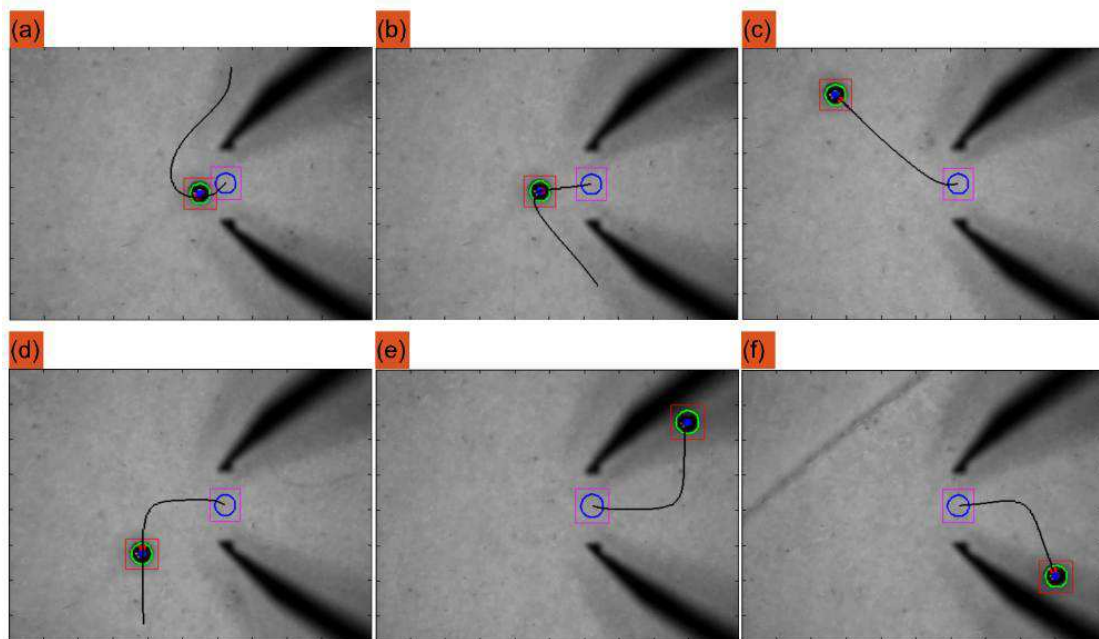


FIG. 5.21 – Quelques résultats expérimentaux sur la planification et le suivi de trajectoires.

(cascade) de boucles d'asservissement visuel (régulation de l'erreur entre une position courante sur la courbe et la prochaine position intermédiaire se trouvant sur la courbe) imbriquées dans une grande boucle d'asservissement visuel (régulation de l'erreur entre la position initiale et la position désirée). L'évolution de l'erreur \mathbf{e} entre la position initiale P_{int} et la position désirée P_{des} est portée sur la figure FIG. 5.22. Nous remarquons que les trois étapes essentielles de cette technique sont l'étape d'initialisation, l'étape de suivi-trajectoire et l'étape de relâchement de la contrainte suivie.

5.10.4 Manipulation de microfibres optiques

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons une autre utilisation de la loi de commande par asservissement visuel 2D multi-échelle et des autres outils développés pendant la thèse. Cette seconde application consiste à manipuler de manière automatique des microfibres optiques en vue de l'assemblage de MOEMS. Par exemple, assembler un MOEMS de type banc optique. Un banc optique (simple) peut être réalisé par l'assemblage de trois composants différents en l'occurrence une source lumineuse (un laser), une microlentille et une microfibre optique. À l'échelle micrométrique, les trois micro-éléments doivent être alignés de manière très précise. Le rayonnement du laser est envoyé vers le centre de la microlentille qui sera récupéré, par la suite, par la microfibre optique. Nous proposons, à travers cette section, une approche permettant de manipuler la fibre optique de manière automatique pour aller la placer avec une grande précision dans le

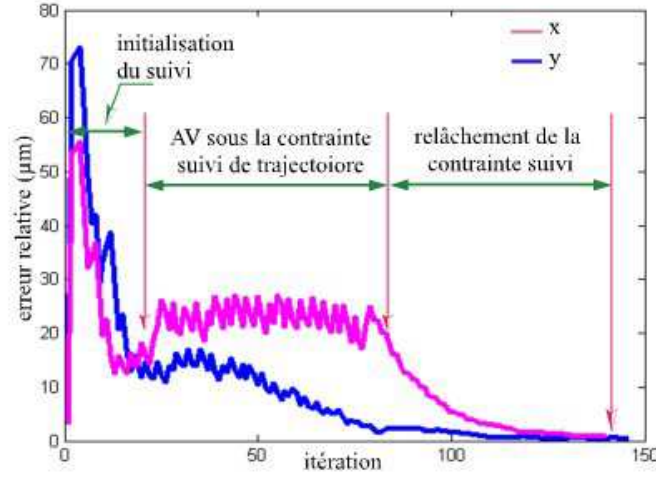


FIG. 5.22 – Exemple d'un suivi de trajectoire montrant la phase initialisation, suivi et relâchement de la contrainte suivi.

MOEMS. Sachant que la fibre optique est quasiment transparente dans l'image, donc sa détection et son suivi pendant le positionnement sont deux tâches compliquées. Cela dit, avec un éclairage relativement puissant, il est possible plus ou moins de distinguer le cœur de la microfibre (FIG. 5.23). La fibre optique a $125 \mu\text{m}$ de diamètre. Le calcul des primitives visuelles $\mathbf{s}(i)$ de type points d'intérêt est jugé intéressant. Ainsi, pour déterminer ces points, nous avons utilisé l'algorithme SIFT ⁶.

- **Détecteur SIFT** : L'algorithme SIFT est dû à Lowe [Low04]. Il a proposé une nouvelle méthode de détection de points d'intérêt dans une image de manière robuste. Le SIFT cherche des informations visuelles dans l'image qui seront invariantes à l'échelle et à la rotation. Il peut être résumé en quatre étapes : (1) détection des extrema en espace et en échelle, (2) extraction des points d'intérêt, (3) calcul des orientations et (4) signature des points d'intérêt. À ce niveau, un grand ensemble de points d'intérêt est détecté, chaque point est représenté par son module $M(x, y)$ et son orientation $\theta(x, y)$ pour une image donnée $I(x, y)$. Ces deux informations sont représentées par :

$$M(x, y) = \sqrt{(I(x+1, y) - I(x-1, y))^2 + (I(x, y+1) - I(x, y-1))^2} \quad (5.60)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I(x, y+1) - I(x, y-1)}{I(x+1, y) - I(x-1, y)} \right) \quad (5.61)$$

En réalité, sur l'image d'une microfibre, la détection se fait largement au niveau du cœur de la fibre (axe optique de la fibre).

⁶Scale-Invariant Feature Transform

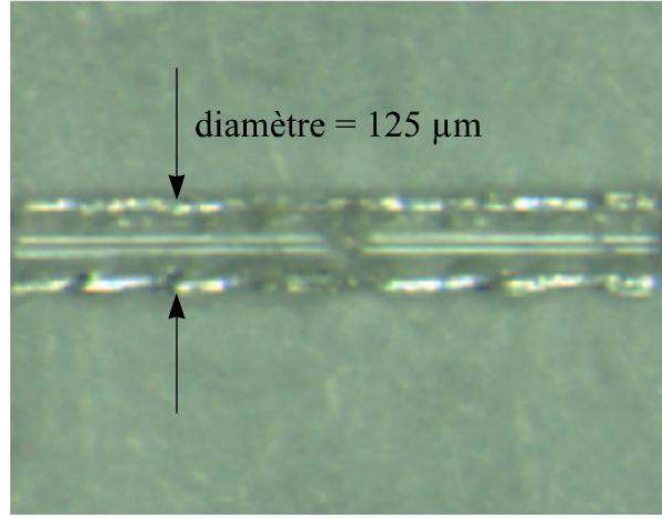


FIG. 5.23 – Microfibre optique.

- **Mise en correspondance** : Avant de pouvoir boucler la loi de commande sur les points d'intérêt détectés, il faut procéder à une mise en correspondance entre ceux de l'image courante et ceux de l'image désirée. Cette étape permet de garder uniquement les points communs entre les deux images (courante et désirée). I et I^* sont respectivement l'image courante prise à l'instant t et l'image désirée (correspondante à la position finale de la fibre, bien positionnée entre les doigts du gripper). Le SIFT a détecté respectivement les points n ($A_i, i = 1, \dots, m$) et m ($B_i, i = 1, \dots, m$) sur l'image I et I^* . Pour faire la mise en correspondance point à point, nous avons utilisé la méthode de matching⁷ S-DIST. Si i et j sont deux points d'intérêt détectés, ces deux points sont matchés s'ils vérifient les conditions suivantes :

$$d_{ij} = \min(D_i) < 0.6 \min(D_i - \{d_{ij}\}) \quad (5.62)$$

et

$$d_{ji} = \min(D_i) < 0.6 \min(D_i - \{d_{ji}\}) \quad (5.63)$$

où

$$D_i = \{d_{ih} = \|S^i - S^h\|\} \quad (5.64)$$

Lors des phases de positionnement (commande de la plateforme mobile), les doigts du gripper restent fixe dans l'image. Alors, les points détectés et appartenant au gripper doivent être enlevés de la liste des points mis en correspondance par la méthode S-DIST. Pour ce faire, les points détectés sur l'image contenant seulement les doigts de la micropince sont retirés de la liste une fois que l'asservissement a commencé. Les points $A_i(k)$ sont rejetés s'ils correspondent aux points gripper $A_g(k)$ par la condition suivante :

⁷ mise en correspondance

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Theta = 0 & \text{si } A_i(k) = A_g(k) \\ \Theta = 1 & \text{sinon} \end{array} \right\} \quad (5.65)$$

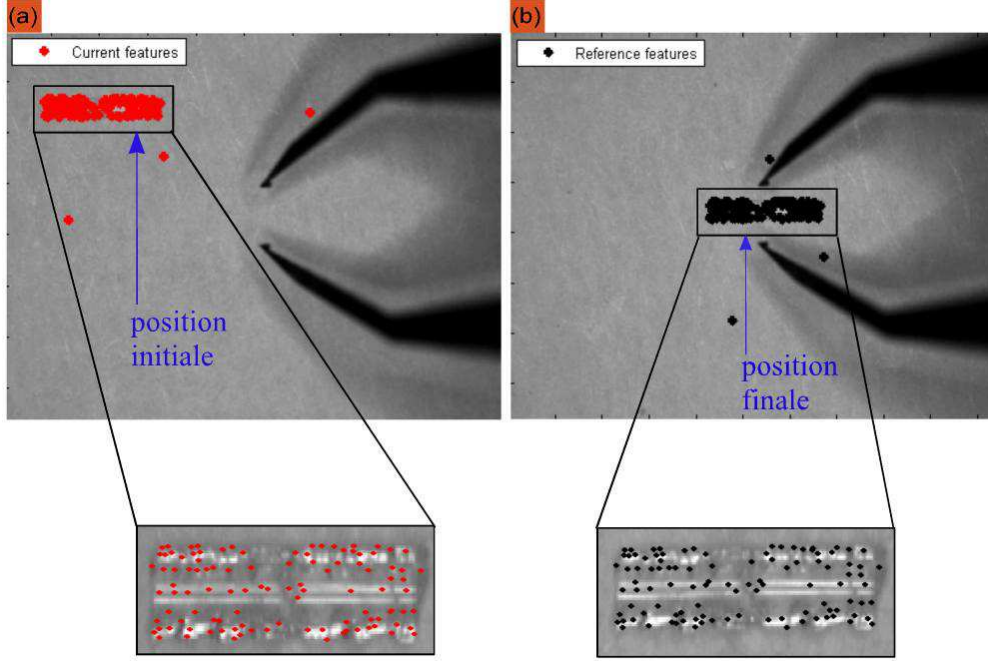


FIG. 5.24 – Application du SIFT sur un positionnement automatique d'une microfibre optique.

La figure FIG. 5.24 illustre, à la fois, les points d'intérêt détectés sur l'image de la fibre optique de $125 \mu\text{m}$ de diamètre à sa position initiale (FIG. 5.24.(a)) et l'image de la même fibre une fois positionnée parfaitement entre les doigts du gripper (FIG. 5.24.(b)). Cela s'est fait de manière automatique en utilisant la loi de commande par asservissement visuel décrite dans ce chapitre.

5.11 De la micromanipulation vers le micro-assemblage

La question qui se pose est la suivante : peut-on utiliser ces mêmes lois de commande pour faire des tâches plus complexes notamment des tâches de micro-assemblage de MEMS ? ce qui constitue l'autre grand objectif des travaux présentés dans ce manuscrit. La réponse est oui et non en même temps. Si nous considérons par définition que l'assemblage est une succession de tâches de manipulation dans le plan (positionnement, orientation, ...) et dans l'espace (positionnement et orientation spatiales, insertion, ...), alors, la commande dans l'image (IBVS) peut être une bonne approche pour les tâches

planaires (ce qui a été montré dans ce chapitre) même avec une connaissance non précise du modèle de l'imageur. Pour les tâches dans l'espace, il faut définir des positions (courantes et désirées) dans l'espace par projection des positions calculées dans l'image vers un repère 3D (d'où la réponse "oui" à l'interrogation posée ci-dessus). La précision ou même la fiabilité des poses 3D calculées par projection dépend étroitement de l'exactitude du modèle de projection utilisé, chose que nous ne pouvons pas garantir vu la difficulté à modéliser un imageur tel que le microscope photonique en plus de tous les paramètres extérieurs qui peuvent amener le modèle défini, à varier dans le temps. Sans surprise, nous ferons appel à l'asservissement visuel 3D qui utilise non pas, directement, des informations visuelles calculées dans l'image mais des poses 3D (orientation et position dans l'espace) pour boucler la loi de commande.

5.12 Conclusion

Nous avons vu à travers ce chapitre, l'intérêt de l'utilisation de la commande à retour visuel pour la manipulation de microcomposants. Après une classification des lois de commandes existantes dans la riche littérature du domaine de l'asservissement visuel, nous avons opté pour une loi de commande de type IBVS. Cependant, l'asservissement visuel dans le micromonde souffre des contraintes liées directement à l'utilisation du microscope photonique comme imageur, notamment la faible profondeur de champ et le faible champ de vision. Pour ses raisons, plus de 50 % des stations de micro-assemblage sont équipées de systèmes de vision distribués. Une nouvelle approche en asservissement visuel 2D multi-échelle a été proposée. Elle consiste en l'intégration de la gestion du zoom dynamique, qui équipe le microscope optique, dans la commande et également l'utilisation des techniques de depth-from-focus et de tracking du gripper par le microscope optique, pour accéder à la profondeur z de la scène. La validation des techniques développées a été effectuée sur la station de micro-assemblage dite "SAMMI" à 5 ddl et équipée du gripper MMOC à 4 ddl. Des cycles de micromanipulation de type pick and place de micro-éléments en silicium de $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ ont été réalisés. Cela a consisté principalement à orienter, positionner, saisir, soulever, transférer et déposer le micro-objet. L'ensemble de ces tâches est réalisé de manière automatique à l'aide de l'asservissement visuel implémenté sur la station. Le cycle a été répété plusieurs fois pour tester la répétabilité et la robustesse de notre approche. Une analyse des résultats a été donc faite pour essayer de comprendre les raisons des échecs du cycle (28 % d'échec contre 72 % de réussite). Il s'est avéré que les effets d'adhésion et électrostatiques sont majoritairement responsables des échecs. Cela dit, les occultations des micro-éléments sous le gripper représentent également 17 % des échecs. Pour y remédier, une planification et suivi de trajectoire a été étudiée et implémentée. Les résultats obtenus restent satisfaisants. Lors d'une autre tentative de validation en manipulant des microfibres optiques, nous avons été confrontés au problème de la détection et du suivi de la fibre lors de l'asservissement visuel. Ainsi pour ce faire, nous avons utilisé le détecteur SIFT suivi de la méthode de mise en correspondance S-DIST pour sélectionner les informations visuelles prises dans la loi de commande. Parmi tous les critères étudiés, un seul

nous intéressait davantage c'est la précision (définie dans le cahier des charges du projet HYDROMEL). Les résultats obtenus sont satisfaisant sur ce point avec une précision moyenne en translation de $1.87 \mu\text{m}$ et $0.37 \mu\text{m}$ pour la rotation.

Pour améliorer cette précision et réaliser des tâches plus complexes comme l'assemblage de MEMS, une loi de commande de type asservissement visuel 3D a été développée et présentée dans le chapitre [6]. Cette étude a été réalisée en collaboration avec Éric Marchand de l'équipe *Lagadic* d'INRIA Rennes Bretagne-Atlantique à travers l'utilisation de leur tracker VISP (Visual Servoing Platform).

Chapitre 6

Asservissement visuel 3D pour le micro-assemblage

Ce chapitre va au delà de la micromanipulation tel que exposée au chapitre précédent, en abordant le problème du montage de microcomposants les uns dans les autres par insertion suivi du collage. Le micro-assemblage est réalisé en mettant en œuvre une commande visuelle 3D suite à la démonstration de la capacité de la bibliothèque VISP de LAGADIC à calculer en temps réel les coordonnées 3D des microcomposants dans les images de la scène obtenues par un seul vidéo microscope. Des résultats exceptionnels ont été obtenus en termes de précision, répétabilité, temps de cycle, degré de complexité de l'assemblage, nombre de microcomposants assemblés, solidité de l'assemblage final.

Sommaire

6.1	Introduction	144
6.2	Motivations	146
6.3	Modélisation de la commande	147
6.3.1	Notations	147
6.3.2	Processus d'assemblage élémentaire	150
6.3.3	Élaboration d'une loi de commande de type pose-based visual servoing	151
6.4	Suivi 3D en temps réel en utilisant le modèle CAO	157
6.4.1	Loi de commande robuste	158
6.5	Application à l'assemblage de MEMS sur deux niveaux	163
6.5.1	Single tracking	163
6.5.2	Nouvelle configuration de la station SAMMI	163
6.6	Étude et analyse des résultats	164
6.6.1	Dual tracking	167
6.7	Analyse de la précision et de la répétabilité	170
6.7.1	Trajectoire du micro-objet	172
6.8	Assemblage de MEMS complexes sur trois niveaux	172
6.8.1	Notations	174
6.8.2	Sans moyens de solidarisation	177
6.8.3	Précision et solidité	178
6.8.4	Avec solidarisation à l'aide d'une colle UV	180
6.9	Conclusion	181

6.1 Introduction

Pendant longtemps, l'assemblage de MEMS se résumait au simple empilement de couches monolithiques en silicium pour aboutir à des structures 3D. Ce type de micro-assemblage est appelé également micro-assemblage 2D1/2. Certainement la forme 3D (forme volumique) d'un microsystème est l'idéal pour permettre d'intégrer un maximum de fonctions contrairement à une forme surfacique. L'assemblage de ce type de MEMS est un vrai challenge pour les laboratoires de recherche. Nombreuses sont les thématiques innovantes gravitant autour de l'assemblage de MEMS qui ont vu le jour. Parmi ces thématiques qui intéressent fortement la communauté du micro-assemblage robotique, on distingue une forte composante de la vision par ordinateur, du traitement d'images, de la commande référencée capteur de vision, de la commande hybride vision/force, de la conception de structures microrobotiques (stations d'assemblage), etc. Comme il a été maintes fois mentionné, les deux composantes vision par ordinateur et asservissement visuel sont les plus essentielles pour réaliser un système d'assemblage de composants 3D compacts complètement autonome. Dans le chapitre [5], il a été démontré que l'asservissement visuel 2D multi-échelle offre une possibilité d'automatiser des

tâches de micromanipulation de type pick and place de micro-éléments. Cela peut aller jusqu'à l'empilement de ces micro-objets pour constituer des MEMS 3D donc en quelque sorte leur assemblage. Insérer un micro-objet de manière verticale dans une fente prédestinée à le recevoir reste également réalisable avec un asservissement visuel dans l'image. Maintenant si la tâche de micro-assemblage devient plus complexe, c'est-à-dire la tâche se déroule dans l'espace et non plus dans le plan image, l'automatisation de la tâche devient plus difficile. Une tâche de micro-assemblage dans l'espace intègre généralement des rotations et des déplacements hors plan. Sans un excellent modèle de projection, il sera probablement impossible par exemple de définir les positions désirées des micro-éléments dans l'espace et ceci avec la plus grande précision possible. Une solution à cette limitation est de pouvoir passer d'un asservissement visuel 2D à un asservissement visuel 3D. Ce dernier reste envisageable seulement si l'on dispose d'une technique pour estimer la position 3D des micro-objets par rapport à la caméra de manière robuste et en temps réel ou très proche de la cadence de la caméra. On trouve très peu de travaux dans la littérature faisant référence à ce genre d'approche dans le domaine du micro-assemblage. Cependant, on peut citer les travaux de Devanathan et *al.* [DWCS06], qui proposent une loi de commande de type asservissement visuel 3D en commutant entre deux caméras (vue locale et vue globale). Ces travaux n'ont jamais été validés expérimentalement sur le micro-assemblage de MEMS. Bien que, d'autres travaux font référence à l'utilisation de la vision 3D, ils se limitent au suivi 3D des micro-objets sous un microscope photonique. Nous pouvons faire référence à [FS98], [BN04], [YN05b], [SPNI06].

Dans ce chapitre, il est question à la fois de l'outil de vision utilisé pour suivre les micro-objets durant les tâches d'assemblage, de l'élaboration de la loi de commande 3D ainsi que de leurs validations par la réalisation de structures 3D. Pour ce qui est du tracking 3D, nous avons collaboré avec Éric Marchand de l'équipe *Lagadic* de l'INRIA Rennes-Bretagne Atlantique en utilisant le tracker VISP pour suivre tridimensionnellement les micro-objets. Le tracker se base sur des connaissances *a priori*, définies par un modèle CAO de l'objet. Ce suivi permet d'estimer la pose entre la caméra et l'objet (pour davantage d'informations sur VISP, se référer à [MSC05]). Cet outil trouve de nombreuses applications dans le domaine de l'asservissement visuel comme dans le domaine de la réalité augmentée. L'estimation de la pose est réalisée via une loi de commande d'asservissement visuel virtuel (voir section [6.4]). Il a été envisagé d'utiliser également la réalité virtuelle dans le domaine de la micromanipulation et du micro-assemblage [FCH04], [AF07]. Cependant, cette dernière approche pose quelques problématiques liées au calibrage. Il est primordial de procéder à un calibrage fort et ceci avec une très grande précision du ou des capteurs de vision utilisés et recommencer le calibrage périodiquement pour s'assurer que les paramètres n'ont pas varié dans le temps. Contrairement à VISP qui a besoin seulement d'un calibrage du microscope optique (calcul des paramètres intrinsèques) approximatif.

Une loi de commande de type asservissement visuel 3D a été développée et testée sur plusieurs micro-assemblages : un MEMS comprenant deux composants sur deux niveaux et un MEMS comprenant cinq composants sur trois niveaux. Deux approches ont

été développées, d'abord le single tracking ¹ puis le dual tracking ². Dans la première configuration, les 5 ddl de la station de micro-assemblage sont contrôlés de manière séquentielle, 3 ddl de la plateforme de positionnement suivi des 2 ddl du micromanipulateur. Dans la deuxième configuration, les 5 ddl de la station sont contrôlés simultanément.

Deux gammes de micro-assemblage ont été étudiées permettant l'assemblage de MEMS sur deux niveaux réalisés à partir de deux composants et l'assemblage de MEMS complexes réalisés à partir de cinq composants assemblés sur 3 niveaux. Dans les deux cas, la tolérance d'insertion est très faible $< 3 \mu\text{m}$. Une étude sur la précision, la répétabilité, le temps de cycle, la modularité, le degré de complexité a permis la validation des approches proposées.

6.2 Motivations

L'objectif est de proposer une solution de commande référencée capteur de vision suffisamment robuste et précise. Une telle approche peut être transférée dans l'industrie pour ainsi être utilisée pour assembler des MEMS en petites et moyennes séries. Pendant longtemps, les industriels travaillant dans le domaine de l'assemblage de MEMS sont restés sceptiques face à ce genre de solutions (automatisation de l'assemblage robotique) pour diverses raisons, notamment celles liées à la rentabilité des approches proposées par les laboratoires de recherche. Pas uniquement la rentabilité de l'assemblage, mais c'est également le coût lié aux stations de micro-assemblage qui nécessitent la mise en place d'un système de vision distribué relativement onéreux, ce qui limite l'attrait des industriels pour cette technologie. La modularité et la flexibilité des approches sont autant de points critiques. Par exemple, une station de micro-assemblage capable d'assembler une large gamme (taille, forme, complexité, etc.) de MEMS est difficilement concevable. C'est pour répondre à ces attentes que nous avons mené les travaux décrits dans ce manuscrit et plus précisément dans ce chapitre. Dans notre démarche, nous avons eu le souci de respecter le cahier des charges suivant :

- Limiter le nombre d'imageurs, qui équipe une station de micro-assemblage, à un seul système de vision qui se résume à une caméra CCD monochrome équipée d'un ensemble objectif + tube,
- Proposer une solution de tracking capable de suivre les micro-objets en temps réel en fournissant leur pose 3D avec le maximum de robustesse. On sous-entend robustesse par rapport aux occultations partielles des micro-objets et capacité à suivre correctement les micro-objets même partiellement flous à cause de la faible profondeur de champ,
- Proposer une loi de commande associée à l'algorithme de tracking pour aboutir à une solution précise et répétable afin d'effectuer des assemblages en série. La

¹tracking d'un seul objet à la fois

²tracking de deux micro-objets au même temps

- précision à atteindre doit être en moyenne inférieure au micromètre en translation et inférieure à un demi-degré en rotation,
- Réduire considérablement l'éternel problème du temps de cycle d'un micro-assemblage. Un cycle de micro-assemblage de moins d'une minute intéresserait les industriels,
 - Réduire considérablement le jeu mécanique (tolérance d'insertion) entre deux micro-objet pour arriver à des réalisations solides et compactes sans fixation externes. Les micro-objets en silicium que nous cherchons à assembler possède une tolérance d'insertion de $3\ \mu\text{m}$. Dans la littérature, la tolérance d'insertion est souvent supérieure à $20\ \mu\text{m}$,
 - Avoir le meilleur taux de réussite sur une série d'assemblage pour garantir un meilleur rendement des approches développées.

6.3 Modélisation de la commande

Avant de procéder à la présentation de la modélisation de la loi de commande 3D développée, nous introduisons un ensemble de notations. Ces notations permettront de mieux comprendre les différentes étapes de l'élaboration de la loi de commande.

6.3.1 Notations

Nous avons choisi les notations suivantes pour pouvoir se retrouver facilement dans la démarche prise pour la modélisation de la commande par asservissement visuel 3D. Nous débutons avec un micro-assemblage que nous appelons élémentaire (simple) c'est-à-dire insérer un micro-objet **B** dans un micro-objet **A**. La représentation des différents repères liés aux micro-objets à assembler dans leurs positions initiales et finales est illustrée sur la figure [FIG. 6.1](#).

Comme nous pouvons le voir sur la figure [FIG. 6.1](#), il existe cinq repères. Soient \mathcal{R}_c , \mathcal{R}_A , \mathcal{R}_{A^*} , \mathcal{R}_B , $\mathcal{R}_{B_2^*}$ les repères respectivement liés à la caméra (microscope photonique), à la pose courante du micro-objet **A**, à la pose désirée de ce dernier, à la position courante du micro-objet **B** et sa position désirée. Cependant, nous définissons un sixième repère \mathcal{R}_{B_1} lié à **B**. Le passage du micro-objet **B** par $\mathcal{R}_{B_1^*}$ est indispensable afin de garantir le déplacement vertical à la fin du processus d'assemblage. Sans cette étape, il serait impossible de faire l'assemblage avec une tolérance d'insertion de seulement $3\ \mu\text{m}$. Nous noterons également qu'une transformation rigide entre le repère \mathcal{R}_a et le repère \mathcal{R}_b est définie par la matrice homogène ${}^a\mathbf{M}_b$ de dimension (3×4) et ayant la forme suivante :

$${}^a\mathbf{M}_b = \begin{bmatrix} {}^a\mathbf{R}_b & {}^a\mathbf{t}_b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

où ${}^a\mathbf{R}_b$ de dimension (3×3) est appelée la matrice de rotation et ${}^a\mathbf{t}_b$ de dimension (3×1) appelé le vecteur de translation.

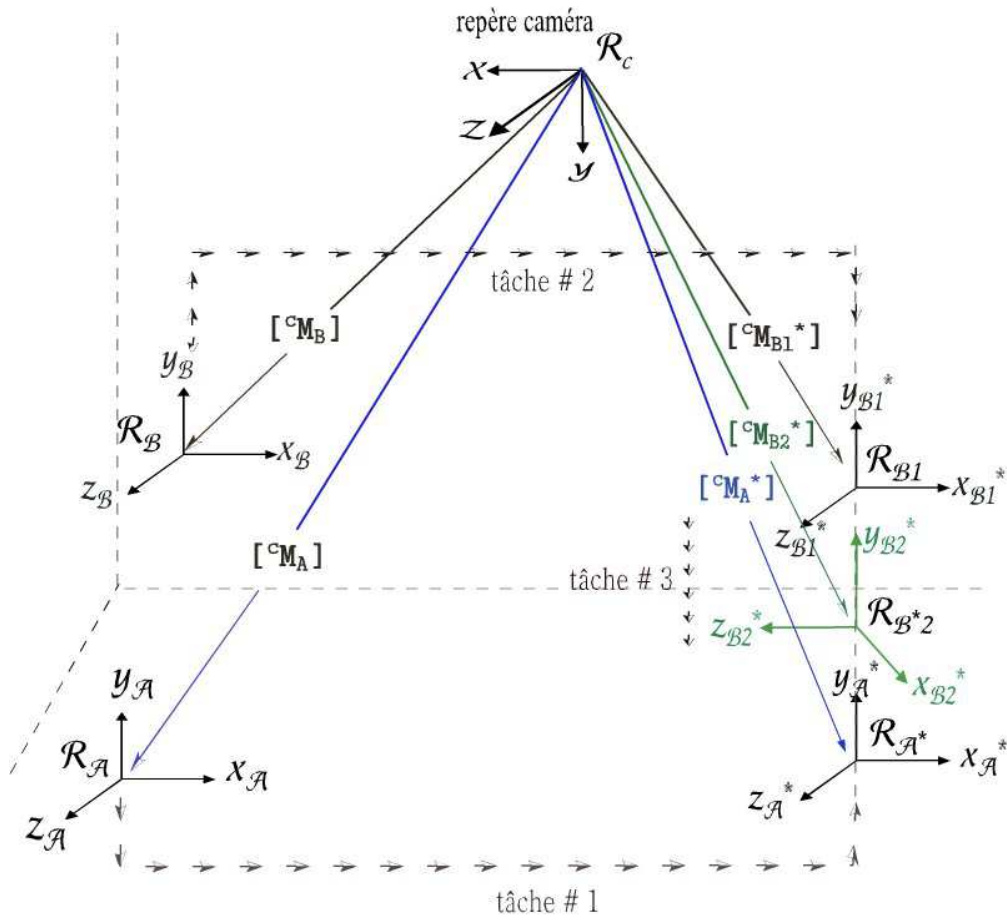


FIG. 6.1 – Schéma représentant les repères liés à la caméra et aux micro-objets à assembler.

L'inverse de la matrice ${}^a\mathbf{M}_b$ est notée ${}^b\mathbf{M}_a^{-1}$ et elle est donnée par :

$${}^b\mathbf{M}_a^{-1} = {}^a\mathbf{M}_b \quad (6.2)$$

Sous une forme plus générale, on notera :

$${}^a\mathbf{M}_b^{-1} = \begin{pmatrix} {}^a\mathbf{R}_b^T & -{}^a\mathbf{R}_b^T {}^a\mathbf{t}_b \\ 0_3 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

La transformation homogène d'un point 3D \mathbf{P} d'un repère a vers un repère b peut être accessible par la relation suivante :

$${}^a\mathbf{P} = {}^a\mathbf{R}_b {}^b\mathbf{P} + {}^a\mathbf{t}_b \quad (6.4)$$

ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} {}^a\mathbf{P} \\ 1 \end{pmatrix} = {}^a\mathbf{M}_b \begin{pmatrix} {}^b\mathbf{P} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

D'autre part, la composition de deux transformations, d'un repère a vers un repère b et du même repère b vers un repère c peut être obtenue par :

$${}^a\mathbf{M}_c = {}^a\mathbf{M}_b {}^b\mathbf{M}_c \quad (6.6)$$

Une autre notation est possible et consiste à considérer la transformation entre le repère \mathcal{R}_a vers le repère \mathcal{R}_b comme étant un vecteur déplacement ${}^a\mathbf{r}_b$ noté :

$${}^a\mathbf{r}_b = ({}^a\mathbf{t}_b, \theta\mathbf{u}) \quad (6.7)$$

avec $\theta\mathbf{u}$ qui représente une rotation d'angle θ portée par l'axe \mathbf{u} . Il est donné par la relation suivante :

$$\theta\mathbf{u} = \frac{1}{2\text{sinc}\theta} \begin{pmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

avec $\theta = \cos^{-1}((r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1)/2)$ et $\text{sinc}\theta = \sin\theta/\theta$.

Les termes $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$ sont les termes de la matrice de rotation \mathbf{R}^3 .

Nous introduisons également les notations suivantes pour l'élaboration de la loi de commande qui permettra d'assembler les micro-objets \mathbf{A} et \mathbf{B} . Ces notations sont :

- ${}^c\mathbf{M}_A$, la transformation homogène entre le repère caméra \mathcal{R}_c et le repère \mathcal{R}_A lié à la position courante du micro-objet \mathbf{A} ,

$${}^3\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

- ${}^c\mathbf{M}_B$, la transformation homogène entre le repère caméra \mathcal{R}_c et le repère \mathcal{R}_B lié à la position courante du micro-objet **B**,
- et
- ${}^c\mathbf{M}_{A^*}$, la transformation homogène entre le repère caméra \mathcal{R}_c et le repère \mathcal{R}_A lié à la position désirée du micro-objet **A**,
- ${}^c\mathbf{M}_{B_1^*}$, la transformation homogène entre le repère caméra \mathcal{R}_c et le repère \mathcal{R}_B lié à la position d'insertion du micro-objet **B**,
- ${}^c\mathbf{M}_{B_2^*}$, la transformation homogène entre le repère caméra \mathcal{R}_c et le repère \mathcal{R}_B lié à la position désirée du micro-objet **B**.

6.3.2 Processus d'assemblage élémentaire

Le processus d'assemblage élémentaire étudié dans cette première partie du chapitre a été décomposé en trois tâches principales : tâche 1, tâche 2 et tâche 3 (voir figure FIG. 6.2).

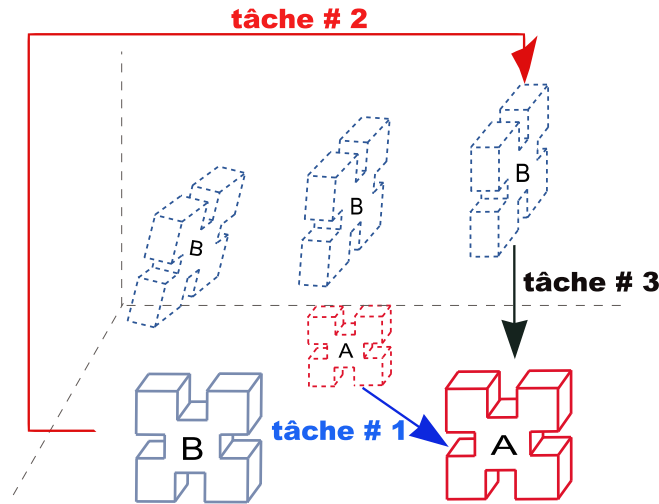


FIG. 6.2 – Représentation des trois tâches essentielles en micro-assemblage.

1. **La tâche 1** : elle se traduit par le déplacement du micro-objet **A** vers sa position désirée (définie par le repère \mathcal{R}_{A^*}). Cette position se trouve sous les doigts du système de gripping. Pour réaliser cette première tâche, une loi de commande de type asservissement visuel 3D est nécessaire pour réguler à zéro l'erreur entre \mathcal{R}_A et \mathcal{R}_{A^*} . Celle-ci est donnée par :

$${}^A\mathbf{M}_{A^*} = {}^c\mathbf{M}_A^{-1} {}^c\mathbf{M}_{A^*} \quad (6.9)$$

La réalisation de cette tâche se fait à travers le contrôle des 3 ddl ($xy\theta$) de la table de positionnement,

2. **La tâche 2 :** elle consiste à ramener le micro-objet \mathbf{B} de sa position initiale vers sa position dite position d'insertion (définie par la repère $\mathcal{R}_{B_1^*}$). La loi de commande à pour objectif de réguler à zéro l'erreur entre le repère \mathcal{R}_B et $\mathcal{R}_{B_1^*}$. On notera alors :

$${}^B\mathbf{M}_{B_1^*} = {}^c\mathbf{M}_B^{-1} {}^c\mathbf{M}_{B_1^*} \quad (6.10)$$

La réalisation de cette deuxième tâche s'effectue avec les 2 ddl ($z\phi$) du micromanipulateur,

3. **La tâche 3 :** elle permet de boucler l'assemblage de ce MEMS à deux niveaux. Une fois que le micro-objet \mathbf{B} se trouve sur la position d'insertion ($\mathcal{R}_{B_1^*}$), il faudra terminer l'assemblage par un dernier déplacement purement vertical. La régulation à zéro de l'erreur entre le repère $\mathcal{R}_{B_1^*}$ et le repère $\mathcal{R}_{B_2^*}$ nous donnera la loi de commande. Elle s'exprime sous la forme suivante :

$${}^{B_1^*}\mathbf{M}_{B_2^*} = {}^{cB_1^*}\mathbf{M}_{B_1^*}^{-1} {}^c\mathbf{M}_{B_2^*} \quad (6.11)$$

Seul un mouvement vertical z est nécessaire pour accomplir cette dernière tâche.

La commutation entre la tâche 2 et la tâche 3 s'effectue une fois que ${}^B\mathbf{M}_{B_1^*}$ est inférieure à un seuil δ_1 fixé au préalable. Cette commande est représentée par le schéma fonctionnel de la figure [FIG. 6.3](#).

La tâche 3 n'est réalisable qu'une fois les tâches 1 et 2 terminées. La tâche 1 est d'abord réalisée puis ensuite la tâche 2 : nous parlerons alors de single tracking. L'autre possibilité est la réalisation simultanée des tâches 1 et 2 : nous parlerons alors de dual tracking.

Dans la plupart des tâches réalisées par une loi de commande de type asservissement visuel, le problème de la définition des positions désirées est délicat à résoudre. Donc il serait étrange que nous ne soyons pas confrontés à cette contrainte. Pour définir ces points, nous avons tout d'abord effectué le micro-assemblage en mode télé-opéré. À partir de là, les trois matrices (${}^c\mathbf{M}_{A^*}$, ${}^c\mathbf{M}_{B_1^*}$, ${}^c\mathbf{M}_{B_2^*}$) ont été enregistrées. Nous regardons dans la suite de ce chapitre que la position désirée ${}^c\mathbf{M}_{B_2^*}$ est difficilement accessible de manière très précise. Dans ce cas là, une autre alternative pour la déterminer de manière automatique sera proposée.

6.3.3 Élaboration d'une loi de commande de type pose-based visual servoing

Il faut, à présent, définir un repère que nous appelons repère monde (fixe). Le repère fixe $\mathcal{R}_{\mathcal{F}}$ est positionné sur la base du microrobot (plateforme de micromanipulation).

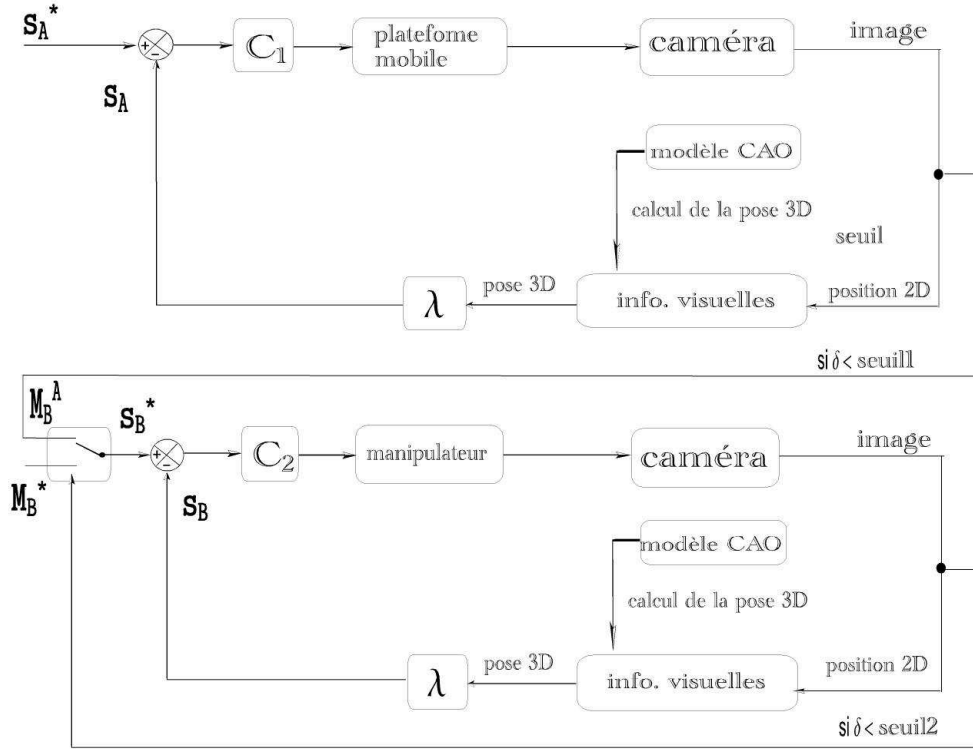


FIG. 6.3 – Schéma bloc de la commande avec une approche “single tracking”. S_A , S_A^* sont respectivement la position désirée et la position courante du micro-objet A.

Ainsi, les quantités cM_A et cM_B doivent être exprimées dans le nouveau repère $\mathcal{R}_{\mathcal{F}}$ de la manière suivante :

$${}^{\mathcal{F}}M_A = {}^{\mathcal{F}}M_c {}^cM_A \quad (6.12)$$

$${}^{\mathcal{F}}M_B = {}^{\mathcal{F}}M_c {}^cM_B \quad (6.13)$$

De même pour les poses désirées, ${}^cM_{A^*}$, ${}^cM_{B_1^*}$, ${}^cM_{B_2^*}$ sont respectivement déduites par :

$${}^{\mathcal{F}}M_{A_1^*} = {}^{\mathcal{F}}M_c {}^cM_{A_1^*} \quad (6.14)$$

$${}^{\mathcal{F}}M_{B_1^*} = {}^{\mathcal{F}}M_c {}^cM_{B_1^*} \quad (6.15)$$

$${}^{\mathcal{F}}M_{B_2^*} = {}^{\mathcal{F}}M_c {}^cM_{B_2^*} \quad (6.16)$$

Le calcul de la matrice de transformation ${}^{\mathcal{F}}M_c$ exprime la pose de la caméra dans le repère fixe $\mathcal{R}_{\mathcal{F}}$ du microrobot. En d’autres termes, le calcul de la matrice ${}^{\mathcal{F}}M_c$ revient

à déterminer les paramètres extrinsèques de la caméra par rapport au repère $\mathcal{R}_{\mathcal{F}}$. Ces paramètres extrinsèques sont la matrice de rotation \mathbf{R} de dimension (3×3) regroupant les trois angles θ , α et γ respectivement autour des axes x , y et z et le vecteur de translation \mathbf{T} de dimension (3×1) qui représente respectivement les trois translations suivant les axes x , y et z .

La méthodologie choisie pour remonter à cette matrice est basée sur l'utilisation du tracker. Un des micro-objets utilisés pour valider les techniques de micro-assemblage développées dans ce chapitre, nous sert de mire. Nous utilisons également les informations très précises que nous retournent les codeurs de chacun de axes des différents ddl. L'exécution de la méthode (que nous appelons auto-calibrage) s'effectue de la manière suivante :

Tout d'abord, et ceci pour une meilleure compréhension de la méthode, nous introduisons les notations suivantes :

\mathcal{R}_o , \mathcal{R}_{ox} et \mathcal{R}_{oy} respectivement les repères liés à la position initiale o de la mire, à la position finale o_x de la mire après un déplacement linéaire de δ_x suivant l'axe x et la position finale o_y de la mire après un déplacement linéaire de δ_y suivant l'axe y (voir figure FIG. 6.4). Les déplacements δ_x et δ_y sont connus.

Nous cherchons à exprimer chacun de ces deux déplacements (connus dans le repère $\mathcal{R}_{\mathcal{F}}$) dans le repère caméra. D'abord, nous nous permettons d'écrire les deux relations suivantes :

$${}^o\mathbf{M}_{ox} = {}^c\mathbf{M}_o^{-1} {}^c\mathbf{M}_{ox} \quad (6.17)$$

et

$${}^o\mathbf{M}_{oy} = {}^c\mathbf{M}_o^{-1} {}^c\mathbf{M}_{oy} \quad (6.18)$$

les deux matrices ${}^o\mathbf{M}_{ox}$ et ${}^o\mathbf{M}_{oy}$ sont respectivement les poses de la mire dans le repère \mathcal{R}_o après les deux translations suivant x et y et ${}^c\mathbf{M}_o^{-1}$ la matrice inverse de ${}^c\mathbf{M}_o$.

Les deux matrices ${}^o\mathbf{M}_{ox}$ et ${}^o\mathbf{M}_{oy}$ sont données respectivement par les relations (6.19) et (6.20).

$${}^o\mathbf{M}_{ox} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & {}^o\mathbf{T}_{ox} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

et

$${}^o\mathbf{M}_{oy} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & {}^o\mathbf{T}_{oy} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

avec

$${}^o\mathbf{T}_{ox} = (v_{1i}, v_{1j}, v_{1k})^\top \quad (6.21)$$

le vecteur 3×1 qui représente la translation effectuée, suivant l'axe x , exprimée dans le repère \mathcal{R}_o entre la position initiale \mathcal{R}_o et la position finale \mathcal{R}_{ox} , de la mire. De même pour ${}^o\mathbf{T}_{oy}$, exprimé par :

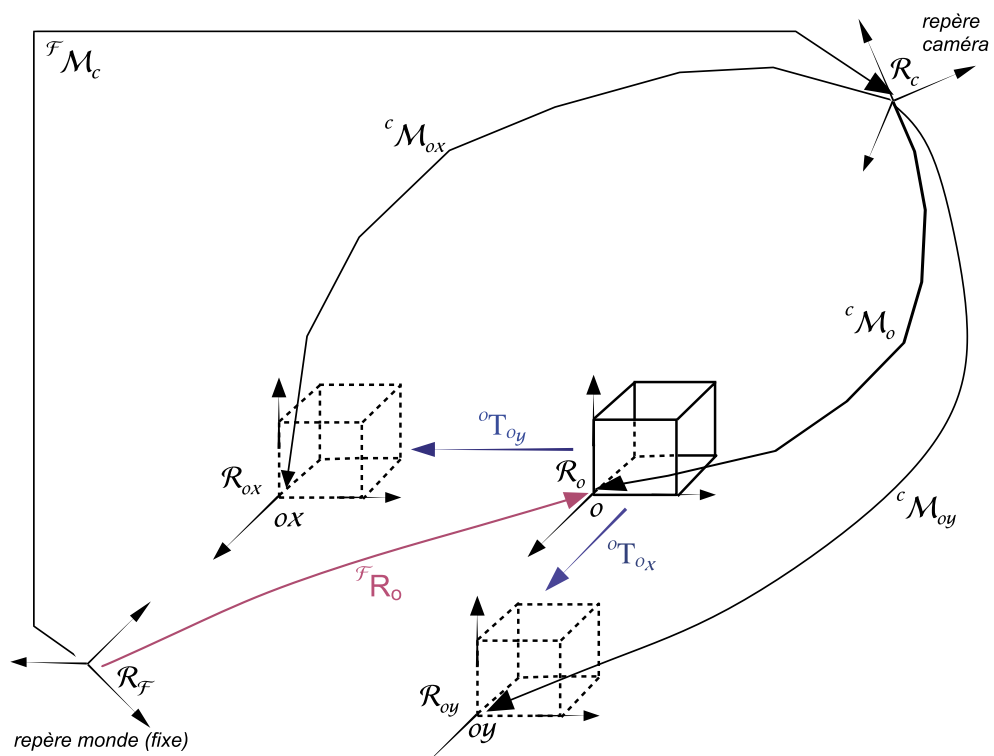


FIG. 6.4 – Méthode de détermination de la position $\mathcal{F}\mathbf{M}_c$ du repère caméra dans le repère fixe $\mathcal{R}_\mathcal{F}$.

$${}^o\mathbf{T}_{oy} = (v_{2i}, v_{2j}, v_{2k})^\top \quad (6.22)$$

le vecteur ${}^o\mathbf{T}_{oy}$ représente la même quantité de déplacement suivant l'axe y , exprimé dans le repère \mathcal{R}_o entre la position initiale \mathcal{R}_o et la position finale \mathcal{R}_{oy} (en pratique les déplacements linéaires de la mire valent 1 mm chacun).

Une fois les deux vecteurs ${}^o\mathbf{T}_{ox}$ et ${}^o\mathbf{T}_{oy}$ obtenus, nous pouvons déduire le troisième vecteur ${}^o\mathbf{T}_{oz}$ (6.23), perpendiculaire au plan xoy , pour constituer un repère 3D lié au repère \mathcal{R}_o .

$$\begin{aligned} {}^oT_{oz} &= (v_{3i}, v_{3j}, v_{3k})^\top \\ &= {}^oT_{ox} \otimes {}^oT_{oy} \end{aligned} \quad (6.23)$$

À partir de ces trois vecteurs, nous pouvons déterminer la matrice de rotation ${}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_o$ qui donnera les angles θ , α et γ de la pose de la caméra dans le repère \mathcal{R}_o . Rappelons que le repère \mathcal{R}_o est coplanaire au repère fixe $\mathcal{R}_{\mathcal{F}}$. La matrice ${}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_o$ est accessible par la relation suivante :

$${}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_o = \begin{pmatrix} v_{1i} & v_{1j} & v_{1k} \\ v_{2i} & v_{2j} & v_{2k} \\ v_{3i} & v_{3j} & v_{3k} \end{pmatrix} \quad (6.24)$$

avec ${}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_o$ qui vérifie les conditions suivantes :

$${}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_o * ({}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_o)^\top = \mathbf{I}_{3 \times 3} \text{ et } \det({}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_o) = 1 \quad (6.25)$$

La vérification de ces deux conditions sur la plateforme, conduit à un déterminant de ${}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_o$ proche de 1 et au produit de ${}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_o$ par sa transposée $({}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_o)^\top$ très proche de la matrice identité \mathbf{I} . Le fait que les deux conditions ne soient pas parfaitement respectées, s'explique par la présence d'un petit défaut d'angle entre les axes de translation x et y de la table de positionnement. En effet, les deux axes ne font pas un angle de $\pi/2$ mais plutôt un angle de 89° . Cependant, ceci n'affecte pas vraiment le comportement de la loi de commande développée.

Une fois ${}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_o$ déterminée, la transformation rigide donnée par la matrice ${}^{\mathcal{F}}\mathbf{M}_c$ entre le repère caméra et le repère lié à la base du robot est exprimée par la relation suivante :

$${}^{\mathcal{F}}\mathbf{M}_c = {}^{\mathcal{F}}\mathbf{M}_o {}^c\mathbf{M}_o^{-1} \quad (6.26)$$

avec :

$${}^{\mathcal{F}}\mathbf{M}_o = \begin{bmatrix} {}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_o & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.27)$$

La section suivante traite du problème de l'élaboration de la loi de commande qui sera utilisée pour réaliser un micro-assemblage de deux microcomposants pour construire un MEMS sur deux niveaux. Cette loi sera également utilisée pour construire un MEMS

beaucoup plus complexe comportant cinq microcomposants assemblés sur trois niveaux, ceci avec une très grande précision.

Dans tous les cas, l'élaboration de loi de commande repose sur la régulation à zéro de l'erreur entre la position courante et la position désirée. Pour y arriver nous choisissons de considérer les informations visuelles \mathbf{s} notées :

$$\mathbf{s} = (\mathcal{F}\mathbf{t}_A, \theta\mathbf{u}) \quad (6.28)$$

qui donne la disposition courante avec $\theta\mathbf{u}$ représentant respectivement l'angle et l'axe de rotation à réaliser pour un microcomposant (définie par ${}^A\mathbf{R}_{A^*}$ s'il s'agit du micro-objet \mathbf{A}) afin d'atteindre la position désirée \mathbf{s}^* donnée par (6.29).

$$\mathbf{s}^* = (\mathcal{F}\mathbf{t}_{A^*}, \mathbf{0}) \quad (6.29)$$

La relation mathématique qui relie les variations $\dot{\mathbf{s}}$ des informations visuelles \mathbf{s} aux vitesses du microrobot $(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})_{\mathcal{F}}^{\top}$ dans le repère fixe $\mathcal{R}_{\mathcal{F}}$ sont données par (6.31), (se référer à [MCSP02]). Dans le cas d'un robot à six degrés de liberté, nous avons :

$$(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})_{\mathcal{F}}^{\top} = (v_x, v_y, v_z, \omega_\theta, \omega_\alpha, \omega_\gamma)_{\mathcal{F}}^{\top} \quad (6.30)$$

Les variations $\dot{\mathbf{s}} = (\mathcal{F}\dot{\mathbf{t}}_A, \dot{\theta}\mathbf{u})^{\top}$ sont donc données par la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} \mathcal{F}\dot{\mathbf{t}}_A \\ \dot{\theta}\mathbf{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{pmatrix}_{\mathcal{F}} \quad (6.31)$$

avec

$$\mathbf{J}_\omega = \mathbf{L}_\omega {}^c\mathbf{R}_{\mathcal{F}} \quad (6.32)$$

où \mathbf{L}_ω vérifie la condition suivante :

$$\mathbf{L}_\omega^{-1}\theta\mathbf{u} = \theta\mathbf{u} \quad (6.33)$$

Cette notation a été introduite par E. Malis dans sa thèse [MCB99] dans le cadre de la commande par asservissement visuel 2D1/2.

Le torseur cinématique associée à \mathbf{s} , a alors la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{pmatrix}_{\mathcal{F}} = -\lambda \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_\omega^{-1} \end{pmatrix} (\mathbf{s} - \mathbf{s}^*) \quad (6.34)$$

Effectuer la première tâche du processus d'assemblage (déplacement du microcomposant \mathbf{A} vers sa position désirée, c'est-à-dire sous les doigts de la micropince) peut être assurée par l'exécution de la commande exprimée par la relation (6.35).

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{pmatrix}_{\mathcal{F}} = -\lambda \begin{pmatrix} \mathcal{F}\mathbf{t}_A - \mathcal{F}\mathbf{t}_{A^*} \\ \mathcal{F}\mathbf{R}_A \theta\mathbf{u} \end{pmatrix} \quad (6.35)$$

Concrètement pour effectuer cette première tâche, nous avons besoin de contrôler les trois ddl (deux translations x et y et une rotation θ) de la table de positionnement. La loi de commande associée à cette tâche est :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix}_{\mathcal{F}} = -\lambda_1 \begin{pmatrix} t_x - t_x^* \\ t_y - t_y^* \\ {}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_A \theta u_{\theta} \end{pmatrix} \quad (6.36)$$

avec :

$${}^{\mathcal{F}}\mathbf{t}_A = (t_x, t_y, 0) \quad (6.37)$$

et

$${}^{\mathcal{F}}\mathbf{t}_{A^*} = (t_x^*, t_y^*, 0) \quad (6.38)$$

De la même manière, l'exécution des tâches 2 et 3 (positionner le micro-objet \mathbf{B} sur sa position désirée intermédiaire d'insertion ensuite sur sa position désirée d'assemblage), nous contrôlons les deux ddl $z\phi$ du micromanipulateur. La loi de commande associée s'exprime :

$$\begin{pmatrix} \dot{z} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix}_{\mathcal{F}} = -\lambda_2 \begin{pmatrix} t_z - t_z^* \\ {}^{\mathcal{F}}\mathbf{R}_B \theta u_{\phi} \end{pmatrix} \quad (6.39)$$

Les gains λ_1 et λ_2 sont remplacés par le gain adaptatif λ_{adp} utilisé dans le chapitre précédent et exprimé par la relation (5.31).

Le système commute de manière automatique entre les différentes tâches 1, 2 et 3, lorsque que l'erreur $\|\mathbf{e}\|$ est inférieure à un seuil prédéfini au préalable, si on se place dans le cas d'une approche single tracking, c'est-à-dire avec seulement le suivi d'un seul micro-objet à un instant donné.

6.4 Suivi 3D en temps réel en utilisant le modèle CAO

Pour être en mesure de contrôler les différents degrés de liberté de la station SAMMI, donc contrôler l'assemblage des MEMS, il est nécessaire de suivre le ou les micro-objets à assembler. Nous avons opté pour une loi de commande de type asservissement visuel 3D pour la réalisation de ces assemblages, donc une méthode de suivi 3D est nécessaire pour fournir les positions tridimensionnelles des micro-objets en temps réel si possible, c'est-à-dire, par exemple, fournir directement la pose 3D ${}^c\mathbf{M}_A$ du micro-objet \mathbf{A} (respectivement ${}^c\mathbf{M}_B$ pour le micro-objet \mathbf{B}) et tout ceci en utilisant uniquement une seule vue de la scène. Nous avons décidé alors d'utiliser la bibliothèque de tracking "ViSP" qui est capable d'assurer cette tâche. Dans ViSP, les informations extraites de l'image sont associées au modèle CAO du sujet tracké pour remonter à la pose 3D de ce dernier. Le 3D model-based tracking ⁴ trouve des applications dans divers domaines : la réalité augmentée [CMC03b], l'asservissement visuel [CMC04], la réalité virtuelle, l'imagerie

⁴suivi 3D basé sur le modèle

médicale et bien d'autres applications industrielles. Le principal avantage d'un tracker couplé à un modèle CAO, c'est que la connaissance 3D implicite de l'objet à suivre permet d'améliorer la robustesse et la performance du suivi. En effet, le tracker est capable de prédire le mouvement caché de l'objet et de réduire les effets introduits par les informations aberrantes extraites de l'image. C'est d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit d'applications dans le micromonde. La qualité des images d'un microscope photonique à fort grandissement ne garantit pas un suivi robuste avec les méthodes conventionnelles de tracking. Des travaux sur le tracking de microsystèmes en utilisant ce genre d'approche menés par Yesin et *al.* [YN05a] ont démontré tout l'intérêt d'associer le modèle CAO de l'objet dans le processus de tracking.

Le fonctionnement de ce genre de tracker repose sur l'utilisation d'approches d'optimisation [DC02], [CMPC06]. Ces techniques d'optimisation consistent à minimiser l'erreur entre les informations observées par la caméra et la projection du modèle de l'objet dans l'image. Il existe un panel de travaux traitant de cette problématique [HJL⁺89], [Low91], [DC02], [CMPC06]. Cela se traduit donc par l'estimation de la pose 3D réelle de la caméra ${}^c\mathbf{M}_o$ ou son déplacement dans l'espace par minimisation de l'erreur Δ (6.40). Ce Δ est donné par l'erreur entre les informations visuelles observées \mathbf{s}^*_i et les mêmes informations courantes $\mathbf{s}_i(\mathbf{r})$ obtenues cette fois-ci par la projection du modèle CAO en utilisant la pose \mathbf{r} (qui est le vecteur basé sur la représentation de la pose ${}^c\mathbf{M}_o$).

$$\Delta = \sum_{i=1}^N (s_i(\mathbf{r}) - s_i^*)^2 \quad (6.40)$$

La minimisation numérique de l'erreur Δ est assurée par l'application d'un algorithme de type itératif tel que Newton-Raphson ou Levenberg-Marquardt. Malheureusement, comme il a été mentionné ci-dessus, les informations visuelles estimées à partir de l'image sont souvent entachées d'erreurs. Pour y remédier, ViSP utilise une méthode statistique qui permet de rendre plus robuste le processus d'estimation. Cette méthode est largement inspirée de la technique des M-estimateurs décrite dans [Hub81]. Le but est de minimiser l'erreur donnée par la relation (6.41). Ci-dessous, est présentée l'approche robuste introduite dans la loi de commande finale.

6.4.1 Loi de commande robuste

Comme il a été mentionné à maintes reprises dans ce manuscrit, en asservissement visuel, la loi de commande réalise la minimisation de l'erreur \mathbf{e} entre une position courante \mathbf{s} et une position désirée \mathbf{s}^* . Cette minimisation est habituellement effectuée par une approche au sens des moindres carrés [Cha02] ne garantissant pas la non-présence de données aberrantes. Ainsi, une approche robuste est nécessaire pour rejeter les données aberrantes, notamment au niveau du calcul des informations visuelles \mathbf{s} et \mathbf{s}^* . Pour y remédier, il est indispensable de trouver un outil qui permette de filtrer ces données aberrantes. Dans [CPMC03], une approche robuste de type M-estimateurs a été intro-

duite dans la loi de commande par asservissement visuel. La minimisation de \mathbf{e} s'exprime alors sous la forme suivante :

$$\mathbf{e}_r = \psi(\mathbf{s}(\mathbf{r}) - \mathbf{s}^*) \quad (6.41)$$

où ψ est la fonction robuste.

Une matrice de pondération \mathbf{D} est introduite de manière à exprimer les poids qui reflètent la confiance dans chaque primitive visuelle. Le terme \mathbf{D} est donc introduit dans la fonction de tâche \mathbf{e} . Ainsi, on a :

$$\mathbf{e}_r = \mathbf{CD}(\mathbf{s}(\mathbf{r}) - \mathbf{s}^*) \quad (6.42)$$

où \mathbf{C} est la matrice de combinaison et \mathbf{D} la matrice diagonale des poids définie par :

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} w_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & w_k \end{pmatrix} \quad (6.43)$$

Les poids w_i reflètent la confiance dans chaque primitive et sont donnés par [Hub81] :

$$w_i = \frac{\psi(\delta_i/\sigma)}{\delta_i/\sigma} \quad (6.44)$$

où $\psi(\delta_i/\sigma) = \frac{\partial}{\partial \delta_i/\sigma} \rho(\delta_i/\sigma)$, ψ est la fonction d'influence et δ_i est le résidu normal donné par $\delta = \Delta_i - \text{Med}(\Delta)$, $\text{Med}(\Delta)$ correspondant à la valeur médiane des résidus. Dans [CPMC03], la fonction de Tukey a été choisie pour rejeter complètement les données aberrantes et leur donner un poids nul. La fonction de Tukey est donnée par :

$$\psi = \begin{cases} u(C^2 - u^2)^2 & |u| \leq C \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (6.45)$$

où le facteur de proportionnalité pour la fonction de Tukey est $C = 4.6851$ qui représente 95 % des valeurs dans le cas d'une distribution gaussienne.

En dérivant l'équation (6.43) avec la supposition que \mathbf{C} et \mathbf{D} soient constantes, nous aboutissons à :

$$\dot{\mathbf{e}} = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{s}} \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{CDL}_s \mathbf{v} \quad (6.46)$$

Si une décroissance exponentielle de \mathbf{e} est introduite (comme il a été indiqué dans le chapitre [5]), nous aboutissons à :

$$\mathbf{CDL}_s \mathbf{v} = -\lambda \mathbf{e} \quad (6.47)$$

Si on se place dans le cas idéal, la loi de commande s'écrit :

$$\mathbf{v} = -\lambda(\mathbf{CDL}_s)^{-1} \mathbf{e} \quad (6.48)$$

En pratique, nous disposons seulement d'une approximation $\widehat{\mathbf{L}}_s$ de \mathbf{L}_s et $\widehat{\mathbf{D}}$ de \mathbf{D} . On alors la nouvelle loi de commande :

$$\mathbf{v} = -\lambda(\mathbf{C}\widehat{\mathbf{D}}\widehat{\mathbf{L}}_s)^{-1}\mathbf{e} \quad (6.49)$$

La matrice de combinaison \mathbf{C} peut être choisie comme la pseudo inverse $(\widehat{\mathbf{D}}\widehat{\mathbf{L}}_s)^+$ de $(\widehat{\mathbf{D}}\widehat{\mathbf{L}}_s)$, ce qui permet d'écrire :

$$\mathbf{C}\widehat{\mathbf{D}}\widehat{\mathbf{L}}_s = (\widehat{\mathbf{D}}\widehat{\mathbf{L}}_s)^+\widehat{\mathbf{D}}\widehat{\mathbf{L}}_s = \mathbf{I} \quad (6.50)$$

L'optimisation non-linéaire de ce problème de minimisation est formulée par [CMPC06] comme un problème de *VVS* (*Virtual Visual Servoing*)⁵. Cette nouvelle méthode considère un asservissement visuel 2D pour contrôler le mouvement de la caméra virtuelle, ceci de telle sorte que l'image du modèle coïncide parfaitement avec la position actuelle dans l'image acquise par la caméra réelle. Ce qui permet d'obtenir un système d'informations virtuelles capables de traiter des scènes complexes.

Une caméra virtuelle définie par sa position \mathbf{r} dans le repère objet peut être déplacée de manière virtuelle afin de minimiser l'erreur Δ . Une fois la convergence atteinte la caméra virtuelle ira s'aligner avec la pose de la caméra réelle. Ce déplacement est effectué tout simplement par l'exécution de la loi de commande (6.54).

Pour approcher au mieux le comportement du système, la loi de commande en boucle fermée est donnée par :

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda(\mathbf{C}\mathbf{D}\mathbf{L}_s)\mathbf{e} \quad (6.51)$$

La stabilité du système est conditionnée par la contrainte suivante :

$$(\mathbf{C}\mathbf{D}\mathbf{L}_s) > 0 \quad (6.52)$$

Cette condition est suffisante pour assurer une décroissance de $\|\mathbf{e}\|$ et la stabilité asymptotique globale du système.

Comme il a été mentionné ci-dessus, si nous approximations la matrice \mathbf{C} par $(\widehat{\mathbf{D}}\widehat{\mathbf{L}}_s)^+$, la condition de stabilité devient alors :

$$(\widehat{\mathbf{D}}\widehat{\mathbf{L}}_s)^+\mathbf{D}\mathbf{L}_s > 0 \quad (6.53)$$

La nouvelle loi de commande est exprimée sous la forme suivante :

$$\mathbf{v} = -\lambda(\mathbf{D}\mathbf{L}_s)^+\mathbf{D}(\mathbf{s}(\mathbf{r}) - \mathbf{s}^*) \quad (6.54)$$

où \mathbf{v} est la vitesse de la caméra virtuelle et \mathbf{L}_s est la matrice d'interaction (jacobien image) associée à \mathbf{s} définie telle que : $\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s\mathbf{v}$. La formulation de Rodriguez est ensuite utilisée pour représenter le vecteur de vitesse \mathbf{v} correspondant au déplacement instantané de la

⁵ Asservissement Visuel Virtuel

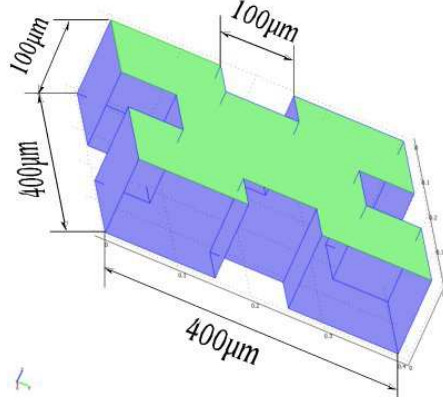


FIG. 6.5 – Le modèle CAO d'un des micro-objets à assembler.

caméra (respectivement de l'objet) permettant une manipulation plus facile de la mise à jour de la pose de la caméra (respectivement de l'objet) durant le mouvement. Pour représenter la mise à jour des déplacements entre l'objet et la caméra, une représentation exponentielle est choisie, ceci en utilisant les matrices homogènes ${}^c\mathbf{M}_o$:

$${}^c\mathbf{M}_o^{t+1} = {}^c\mathbf{M}_o^t e^{\mathbf{v}} \quad (6.55)$$

avec t est le nombre d'itérations du processus de minimisation et ${}^c\mathbf{M}_o^{t+1}$ la pose résultante.

Dans le cadre des travaux décrits dans ce manuscrit, nous aurons à considérer les informations correspondantes à la distance entre la projection du modèle CAO du micro-objet (voir figure FIG. 6.5) et les informations locales obtenues par une recherche 1D suivant la normale au contour du micro-objet. Plus précisément, si on note $\mathbf{p}_i, i = 1..k$ ces points et $\mathbf{l}_i(\mathbf{r})$ la projection de la droite correspondante de la pose \mathbf{r} , l'équation (6.41) peut être réécrite de la manière suivante :

$$\Delta_{\mathcal{R}} = \sum_{i=1}^k \rho(d_{\perp}(\mathbf{p}_i, \mathbf{l}_i({}^c\mathbf{r}_o))) \quad (6.56)$$

avec $d_{\perp}(\mathbf{p})\mathbf{l}(\mathbf{r})$ est la distance orthogonale entre \mathbf{p} et $\mathbf{l}(\mathbf{r})$. La distance $d_{\perp}(\cdot)$ est représentée sur la figure FIG. 6.6. La matrice d'interaction utilisée dans (6.54) est donnée dans [CMPC06]. Dans ce cas, les positions désirées de ces distances sont égales à 0. Le traitement consiste à calculer, pour chaque point du contour considéré, la composante de déplacement perpendiculaire au contour entre deux images à t et $t + \Delta t$. L'astuce consiste à rechercher le pixel \mathbf{p}^{t+1} dans l'image I^{t+1} de chaque pixel \mathbf{p}^t . Le pixel \mathbf{p}^{t+1} est recherché dans un voisinage défini par un masque M dépendant de l'orientation de l'arête projetée, autour du pixel \mathbf{p}^t . Un intervalle de recherche 1D est défini suivant la normale à l'arête projetée.

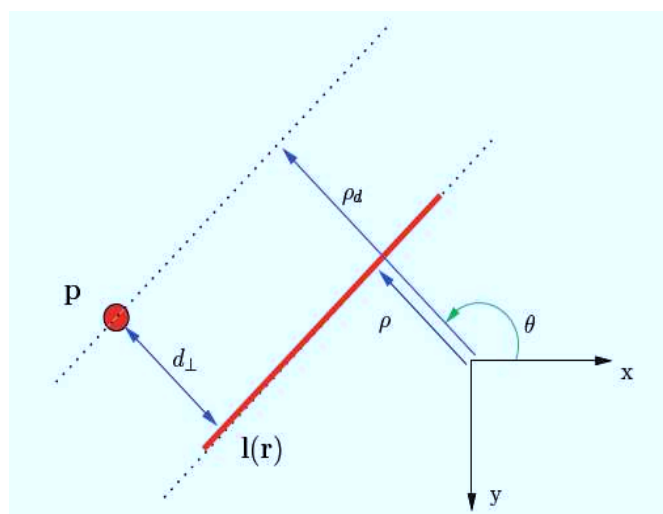


FIG. 6.6 – Distance point-droite.

La figure FIG. 6.7 illustre une application de l'algorithme de tracking décrit ci-dessus sur un des micro-objets en silicium dont on cherche à faire l'assemblage. Les informations visuelles illustrées en couleur rouge représentent les points détectés et sont utilisées pour estimer la projection et les traits montrés en couleur blanche désignent la projection du modèle CAO dans l'image.

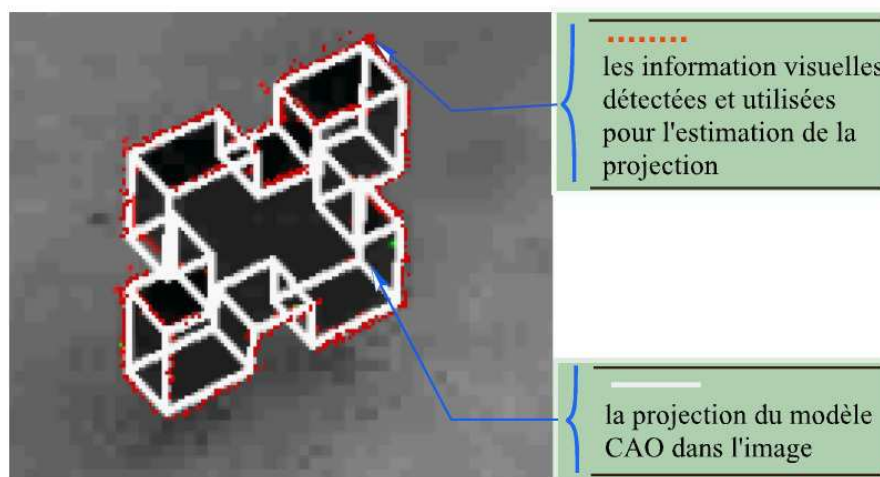


FIG. 6.7 – Illustration du fonctionnement du tracker sur un microcomposant.

Les approches décrites ci-dessus ont été utilisées pour la réalisation d'une série de micro-assemblages. L'objectif est de pouvoir tester la viabilité de ces approches. La validation passe par la construction de microsystemes 3D sur 2 niveaux et d'autre part sur des microsystemes 3D sur 3 niveaux intégrant plusieurs microcomposants.

6.5 Application à l'assemblage de MEMS sur deux niveaux

Pour ce faire, deux approches ont été considérées, le single tracking et le dual tracking. Une comparaison des résultats obtenus par les deux approches est effectuée, notamment au niveau temps de cycle nécessaire pour réaliser un assemblage. Ceci afin de faire un choix sur l'approche qui sera appliquée aux travaux menés dans l'assemblage de MEMS.

6.5.1 Single tracking

Les travaux développés dans ce chapitre ont été d'abord testés et validés sur un assemblage de deux micro-objets de $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ en silicium (voir la figure [FIG. 6.2](#)). L'assemblage se fait suivant les encoches se trouvant sur les côtés des micro-objets. Ces encoches mesurent $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ avec seulement $3\ \mu\text{m}$ de tolérance d'insertion (jeu mécanique). Par conséquent, une grande partie de la difficulté de l'assemblage de ces deux composants réside dans cette faible tolérance d'insertion. Cependant, il n'y a pas que des inconvénients dans cela, car si l'assemblage est réussi, le MEMS obtenu sera suffisamment solide pour qu'il ne soit pas nécessaire de faire appel à des moyens de fixation externes.

Le bon fonctionnement du tracker est conditionné par la présence d'une bonne perspective 3D du sujet à tracker. Le stéréomicroscope optique équipant déjà la station SAMMI offre seulement une vue de dessus. Aucune perspective de la scène n'est possible du fait que la plateforme mobile est positionnée parallèlement au plan image du microscope. En conséquence, la configuration de la station SAMMI a été repensée.

6.5.2 Nouvelle configuration de la station SAMMI

Nous avons intégré un autre imageur pour obtenir cette perspective 3D de la scène et des micro-objets à assembler. L'imageur a été placé de façon à avoir une vue plongeante à 45° par rapport au plan xoy de la table de positionnement. La nouvelle configuration de la station SAMMI est illustrée sur la figure [FIG. 6.8](#).

- **Nouvel imageur** : il s'agit d'une caméra monochrome *Allied* de chez *Marlin*. Cette caméra CCD fournit des images de 960×1280 pixels associée à un tube-objectif ayant une longueur focale de $11.452\ \text{mm}$ ([FIG. 6.9](#)). La fréquence d'acquisition est de 7.5 images par seconde. L'ensemble est monté sur une table de positionnement manuelle pour permettre la mise au point sur la scène de manière efficace et aisée.

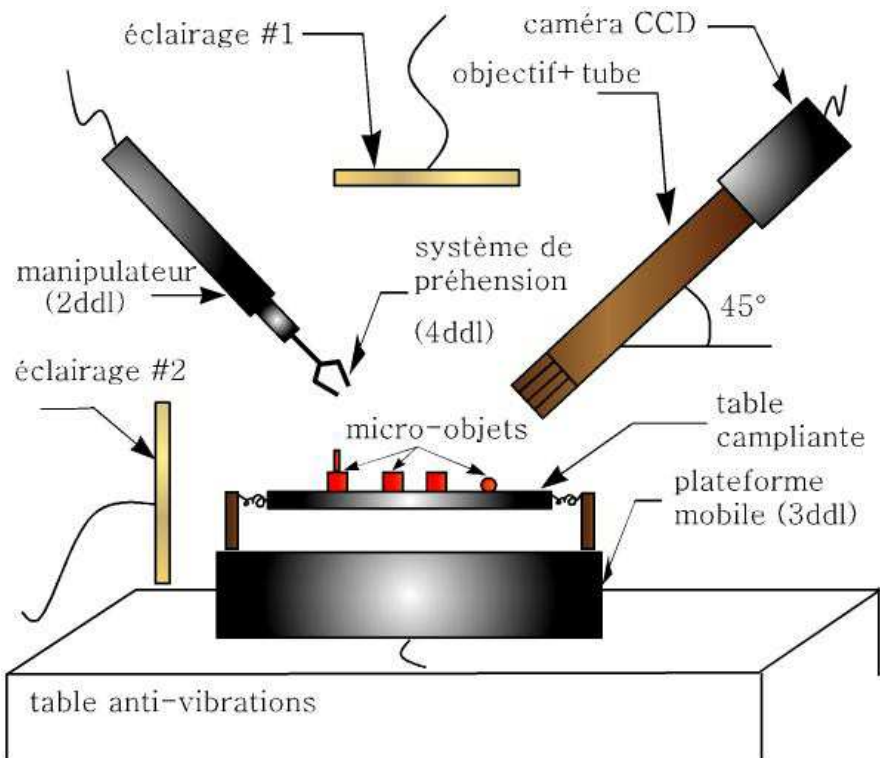


FIG. 6.8 – Nouvelle configuration de la station de micro-assemblage SAMMI.



FIG. 6.9 – Nouvel imageur sur la station SAMMI.

6.6 Étude et analyse des résultats

La partie expérimentale consiste dans un premier temps à assembler le MEMS à deux niveaux. Cet assemblage a été répété plusieurs fois (un résumé de dix assemblages effectués est illustré sur le tableau [TAB. 6.1](#)) pour évaluer la robustesse, la précision et la répétabilité des approches proposées. Un intérêt est évidemment porté sur l'estimation du temps de cycle nécessaire pour assembler deux microcomposants. On note respecti-

vement $T_{\text{positionnement objet A}}$, $T_{\text{insertion objet B}}$ et T_{complet} le temps nécessaire à positionner le micro-objet **A**, le temps nécessaire à positionner et à insérer le micro-objet **B** dans le micro-objet **A** et le temps total requis pour effectuer l'assemblage. À chaque micro-assemblage effectué, la position initiale du micro-objet change par rapport à la position des micro-objets des assemblages précédents.

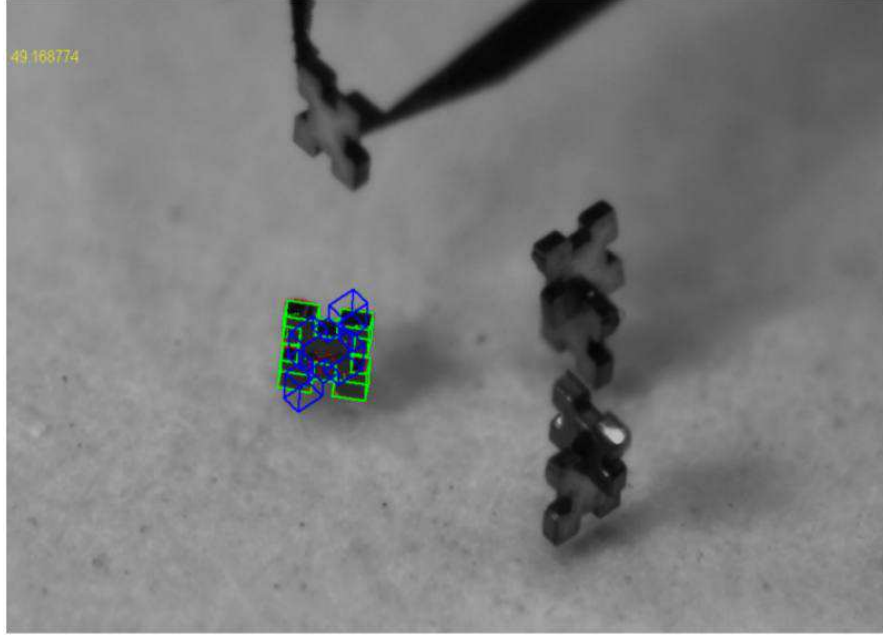


FIG. 6.10 – Photographie de la scène durant le troisième micro-assemblage.

La figure FIG. 6.10 montre une photographie de la plateforme de positionnement durant le troisième micro-assemblage (parmi ceux présentés dans la tableau TAB. 6.1).

La séquence d'images illustrée sur la figure FIG. 6.11 montre un assemblage de MEMS sur deux niveaux. Sur cet exemple, une approche "single tracking" a été utilisée. L'image 6.11.(a) marque le début du processus d'assemblage. On remarque que le modèle CAO de la pièce est projeté en bleu sur le micro-objet **A** suivi et en vert, la position désirée définie préalablement en mode télé-opéré. Les images 6.11.(b),(c),(d) représentent des positions intermédiaires du microcomposant **A** lors de l'exécution de la tâche 1. L'image 6.11.(e) marque la fin de la première tâche (les deux positions courante et désirée se superposent parfaitement). À cet instant, le micro-objet **A** est positionné de manière précise sous les doigts de la micropince et prêt à recevoir le micro-objet **B**. L'image 6.11.(f) marque alors le début de la commande du manipulateur pour aller insérer **B** dans **A**. Les images 6.11.(g),(h) illustrent des positions intermédiaires de la tâche 3. La séquence s'achève par un zoom sur l'assemblage qui vient d'être effectué, illustré

N°	$T_{\text{positionnement objet A}} \text{ (sec)}$	$T_{\text{insertion objet B}} \text{ (sec)}$	$T_{\text{complet}} \text{ (sec)}$
micro-assemblage 1	25.9	13.9	39.8
micro-assemblage 2	29.7	11.7	41.4
micro-assemblage 3	22.0	12.0	34.0
micro-assemblage 4	28.3	11.5	39.8
micro-assemblage 5	35.7	11.7	47.4
micro-assemblage 6	31.3	12.0	43.3
micro-assemblage 7	28.8	11.8	40.6
micro-assemblage 8	29.4	11.9	41.3
micro-assemblage 9	27.8	11.9	39.7
micro-assemblage 10	29.4	11.7	41.1
Moyenne	28.8	12.0	40.8

TAB. 6.1 – Quelques micro-assemblages réalisés par l’approche PBVS (single tracking).

sur l’image (6.11.(i)).

Le micro-assemblage le plus rapide a été réalisé en 38 secondes et le plus long en 43.3 secondes. Le temps moyen des dix réalisations est estimé à 40.8 secondes. Si on regarde de plus près, la tâche 1 a été réalisée en un temps moyen de 28.8 secondes, ce qui fait pratiquement deux fois plus de temps que pour la réalisation des deux tâches 2 et 3. Globalement, le micro-assemblage d’un MEMS 3D sur deux niveaux requiert un peu plus de 40 secondes. Ceci constitue une grande avancée dans le domaine du micro-assemblage robotique (sériel) de MEMS 3D en utilisant une commande référencée capteur de vision, sachant que les espoirs des industriels de voir un jour ce genre d’approches sur les chaînes de micro-assemblage de petites et moyennes séries reposent particulièrement sur cet aspect là, c’est-à-dire la réduction du temps du cycle d’assemblage. Rappelons que le coût d’un MEMS est étroitement lié à son coût d’assemblage. Souvent quand il s’agit d’assemblage de MEMS en petites ou moyennes séries, c’est un opérateur humain qui réalise l’assemblage. Ceci exige de l’opérateur humain qu’il soit en bonne santé, capable de travailler plusieurs heures d’affilé et avoir une bonne précision du geste, etc. Il faut plusieurs mois d’entraînement avant que l’opérateur humain soit *efficace*. En comparant, par exemple, le temps de cycle mis par un opérateur humain pour assembler un MEMS et celui nécessaire pour effectuer le même assemblage, mais cette fois-ci en mode automatique (par les approches étudiées dans ce chapitre), la différence est flagrante. Un opérateur humain ayant plus d’un mois de prise en main de la station SAMMI met environ quinze fois plus de temps que le mode automatique. L’intérêt de l’automatisation de l’assemblage de MEMS ne s’arrête pas ici. Il a été démontré, dès que l’assemblage augmente en degré de complexité et précision, le mode manuel n’arrive plus à satisfaire ce genre d’exigences tandis que le mode automatique répond à ces attentes. Nous aurons l’occasion de revenir sur cet aspect dans la section [6.8].

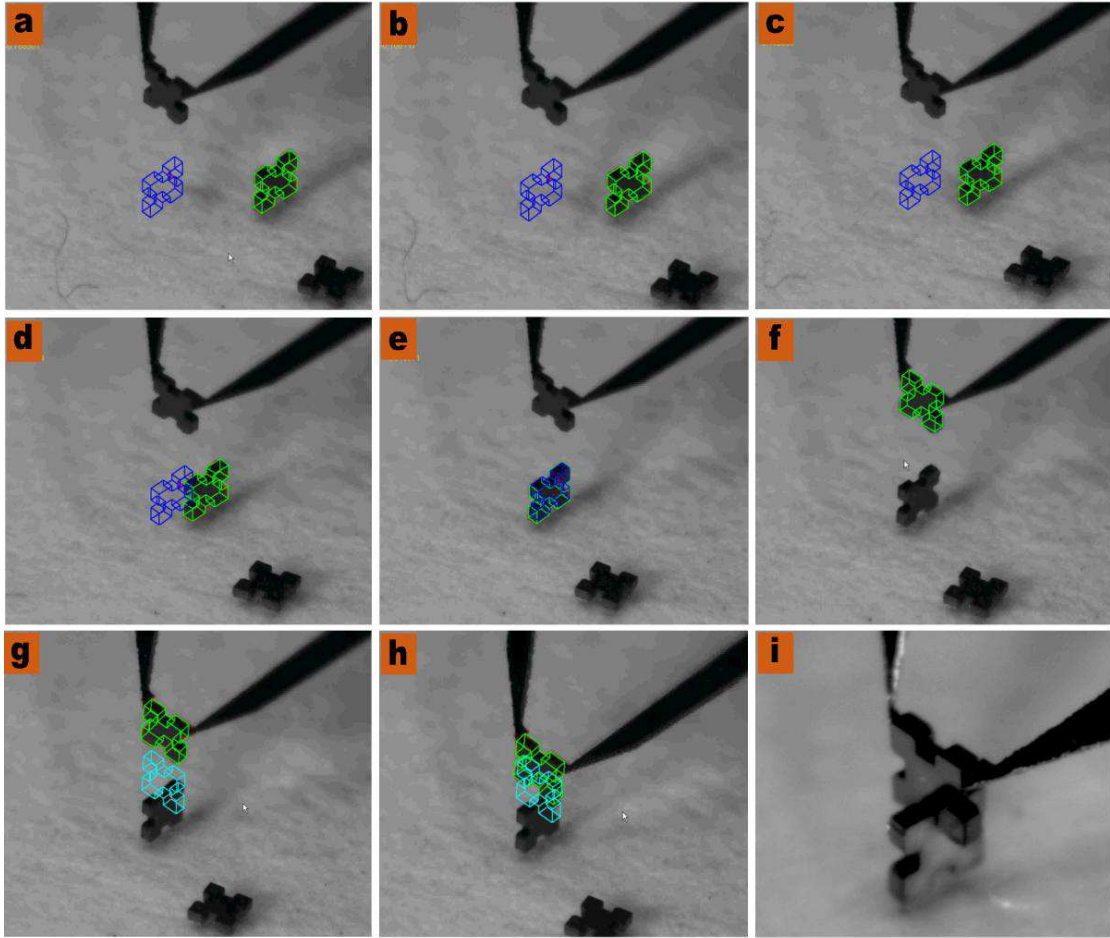


FIG. 6.11 – Séquence d’images prises durant l’assemblage de deux microcomposants sur deux niveaux par l’approche PBVS (approche single tracking).

6.6.1 Dual tracking

L’idée est de réaliser le suivi des deux micro-objets à assembler simultanément. L’objectif est bien évidemment de pouvoir concevoir une loi de commande qui nous permettra de contrôler les 5 ddl de la station SAMMI en même temps, ceci afin donner un comportement plus fluide aux tâches de micro-assemblage à effectuer. La nouvelle loi de commande permet d’effectuer simultanément les tâches 1 et 2 (5 ddl), suivi de la tâche 3 (1 ddl) qui finalisera l’assemblage par un déplacement vertical de l’objet **B**. Cette loi de commande a pour rôle de réguler à zéro les erreurs entre la position courante ${}^c\mathbf{M}_A$ et la position désirée ${}^c\mathbf{M}_{A^*}$ du micro-objet **A**, ainsi que l’erreur entre la position courante ${}^c\mathbf{M}_B$ et la position désirée ${}^c\mathbf{M}_{B^*}$ pour le micro-objet **B**. La représentation des repères liés aux micro-objets **A** et **B**, dans le cas d’un dual tracking, est montrée sur la

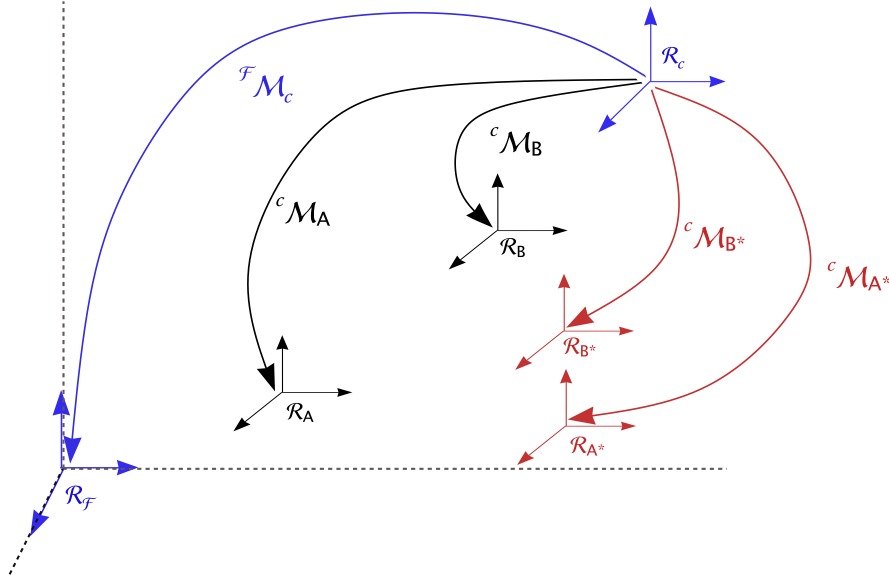


FIG. 6.12 – Dual tracking.

figure FIG. 6.12.

La loi de commande qui permet de réaliser les deux tâches 1 et 2 de manière parallèle est :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x - t_x^* \\ t_y - t_y^* \\ t_z - t_z^* \\ {}^F\mathbf{R}_A \theta u_\theta \\ {}^F\mathbf{R}_B \theta u_\phi \end{pmatrix} \quad (6.57)$$

Le schéma fonctionnel de la commande utilisée afin d'assembler un MEMS à deux composants est illustré sur la figure FIG. 6.13.

La séquence d'images illustrée sur la figure FIG. 6.14 montre un micro-assemblage en utilisant l'approche "dual tracking". Le début de l'assemblage est montré sur l'image 6.14.(a), le tracker suit, en même temps, les deux micro-objets à assembler. À ce moment les deux tâches 1 et 2 sont exécutées de manière simultanée. Les images 6.14.(b).(c).(d).(e) représentent les positions intermédiaires des deux micro-objets **A** et **B**. L'image 6.14.(f) marque la fin des tâches 1 et 2, c'est-à-dire le microcomposant **A** a atteint sa position désirée, de même pour le microcomposant **B** qui atteint sa position finale. Ensuite, le micro-objet **B** entame un déplacement vertical (tâche 3) pour aller s'insérer dans **A**. L'image 6.14.(i) marque la fin de l'assemblage du MEMS sur deux niveaux avec une approche dual tracking.

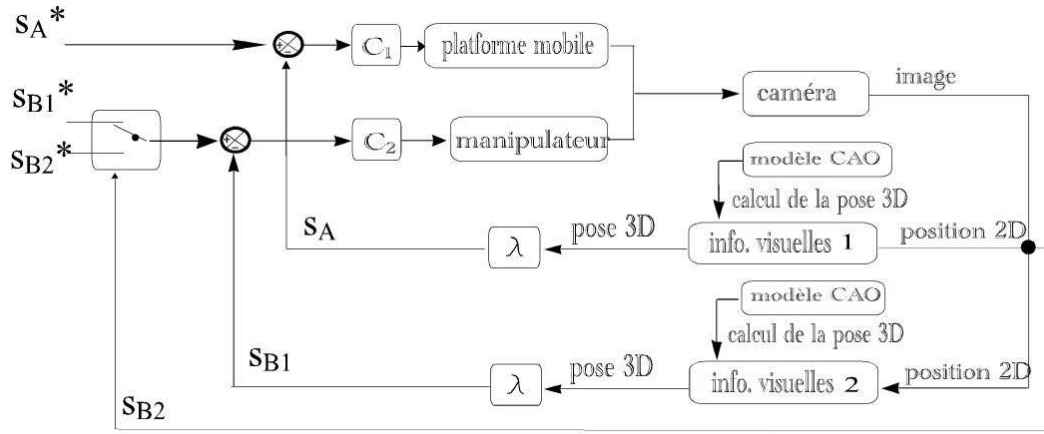


FIG. 6.13 – Schéma bloc de la loi de commande avec un dual tracking.

Ce même micro-assemblage a été répété plusieurs fois pour tester la précision, la répétabilité et surtout calculer le temps de cycle nécessaire pour réaliser un assemblage en dual tracking. Les résultats de dix assemblages réalisés sont portés sur le tableau TAB. 6.1.

N°	$T_{\text{positionnement objet A+B}} \text{ (sec)}$	$T_{\text{insertion objet B}} \text{ (sec)}$	$T_{\text{complet}} \text{ (sec)}$
micro-assemblage 1	39.1	7.2	46.3
micro-assemblage 2	38.3	6.5	44.8
micro-assemblage 3	42.1	7.0	49.1
micro-assemblage 4	50.4	8.3	58.7
micro-assemblage 5	42.0	7.1	49.1
micro-assemblage 6	55.8	6.0	61.8
micro-assemblage 7	45.3	6.8	52.1
micro-assemblage 8	44.1	9.2	53.3
micro-assemblage 9	39.1	7.7	46.8
micro-assemblage 10	44.1	7.9	52.2
Moyenne	44.1	7.4	51.4

TAB. 6.2 – Quelques micro-assemblages réalisés par l'approche PBVS (approche dual tracking).

Deux inconvénients sont à noter sur l'utilisation de l'approche dual tracking. Premièrement, si les deux micro-objets à suivre se trouvent très proches l'un de l'autre, le tracker peut confondre les deux micro-objets. Cela conduit à un échec du tracking. Deuxièmement, suivre deux micro-objets simultanément exige deux fois plus de temps de

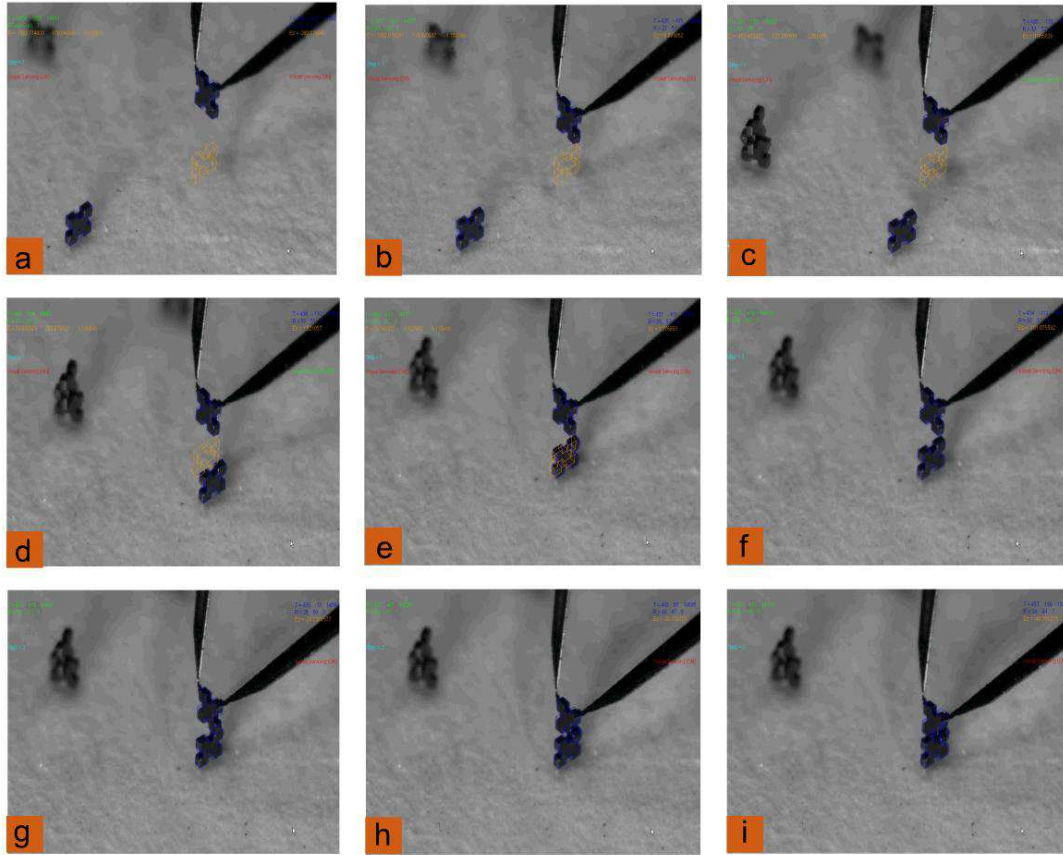


FIG. 6.14 – Séquence d’images d’un micro-assemblage en utilisant l’approche dual tracking.

calcul ce qui implique la possibilité de rater de temps en temps une image ⁶ de la caméra. D’ailleurs le tableau TAB. 6.2 montre qu’il faut en moyenne 51.4 secondes pour réaliser un assemblage tandis qu’il faut seulement 40.8 secondes avec l’approche single tracking. Une différence non-négligeable si nous voulons éventuellement réduire le coût d’assemblage des MEMS. Ainsi, nous optons pour l’utilisation de l’approche single tracking pour la suite des travaux.

6.7 Analyse de la précision et de la répétabilité

La figure FIG. 6.15 illustre l’évolution des erreurs relatives e_x , e_y et e_θ respectivement des trois ddl x , y et θ de la plateforme mobile, lors de l’exécution de la tâche 1, en fonction du nombre d’itérations i nécessaire à la commande pour qu’elle converge. Aux mêmes instants, sur la figure FIG. 6.16, sont représentées les erreurs relatives e_z et e_ϕ respec-

⁶frame, de l’anglais

tivement des deux ddl z et ϕ du micromanipulateur, en fonction du nombre d'itérations j .

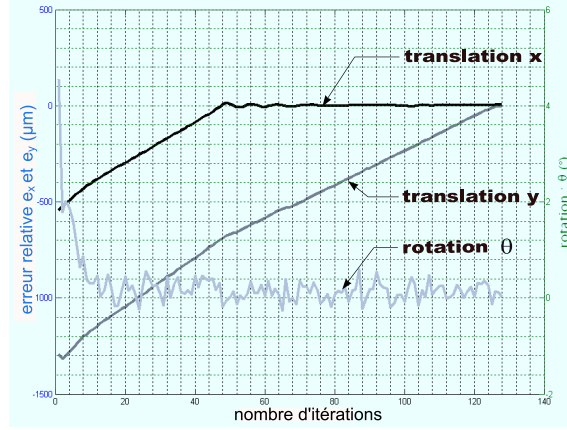


FIG. 6.15 – Évolution des erreurs relatives (e_x , e_y et e_θ) lors de la commande des 3 ddl de la plateforme de positionnement.

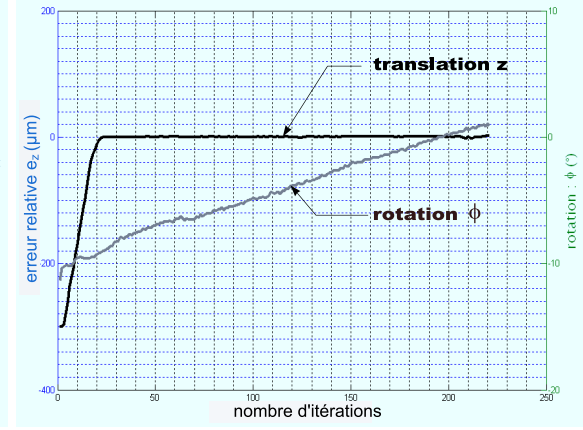


FIG. 6.16 – Évolution des erreurs relatives (e_z et e_ϕ) lors de la commande des 2 ddl du micromanipulateur.

Pour l'exemple représenté sur les figures FIG. 6.15 et FIG. 6.16, les erreurs relatives obtenues sont :

- l'erreur de positionnement suivant l'axe x du micro-élément **A** (tâche 1) est $e_x = 3.52 \mu\text{m}$,
- l'erreur de positionnement suivant l'axe y du micro-élément **A** (tâche 1) est $e_y = 0.29 \mu\text{m}$,
- l'erreur d'orientation planaire θ autour de l'axe z du micro-élément **A** (tâche 1) est $e_\theta = 0.17^\circ$,
- l'erreur de positionnement suivant l'axe z du micro-élément **B** (tâche 2) est $e_z = 2.28 \mu\text{m}$,
- l'erreur de positionnement suivant l'axe z dans le plan xoy du micro-élément **B** (tâche 3) est $e_z = 0.17 \mu\text{m}$,
- l'erreur d'orientation spatiale ϕ du micro-élément **B** (tâche 3) est $e_\phi = 0.80^\circ$.

Les valeurs des différentes erreurs de la commande présentées ci-dessus, nous ont été fournies par les codeurs de chacun des axes qui composent la partie mécanique de la station SAMMI via une interface homme-machine utilisée pour le contrôle.

Comme nous pouvons le constater sur la figure FIG. 6.17 qui représente une prise d'image de l'assemblage effectué sous un MEB, une bonne précision d'assemblage est atteinte. Bien évidemment, l'assemblage du MEMS est exécuté sur la station SAMMI et nous avons transporter les MEMS sur une palette vers le MEB pour le visualiser. Ce transfert est possible grâce à la solidité du MEMS assemblé. La solidité vient du fait que la tolérance d'insertion est suffisamment faible ($< 3 \mu\text{m}$), pour que le MEMS tienne

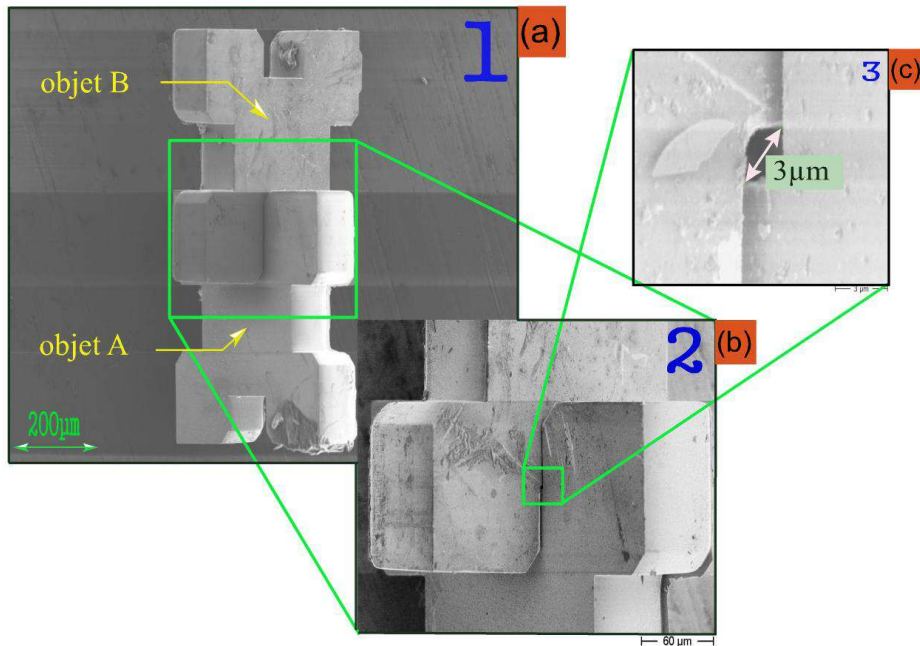


FIG. 6.17 – Assemblage réalisé de manière automatique et visualisé sous le MEB.

sans aucune fixation extérieure. Les images 6.11.(b).(c) montrent un zoom sur les deux parties insérées des deux micro-objets, on peut remarquer la faible tolérance d'insertion.

6.7.1 Trajectoire du micro-objet

Le comportement de la caméra/robot est sans doute un des avantages de la commande en asservissement visuel 3D. Théoriquement, la formulation de la loi de commande 3D choisie conduit à une trajectoire en ligne droite du micro-objet dans l'espace. Bien que, l'asservissement visuel 3D souffre de l'absence de contrôle de la trajectoire dans le plan image, il s'avère idéal dans notre cas.

Sur la figure FIG. 6.18 est représenté le comportement d'un microcomposant durant son positionnement entre les doigts du gripper. La trajectoire donnée par la plateforme mobile au micro-objet est très proche (pour ne pas dire parfaitement) de la ligne droite.

6.8 Assemblage de MEMS complexes sur trois niveaux

Après la validation des outils développés pour l'assemblage de MEMS sur deux niveaux, nous nous sommes intéressés à des MEMS beaucoup plus complexes. Ces nouveaux MEMS 3D intègrent plusieurs microcomposants (5 micro-éléments) sur plusieurs niveaux (3 niveaux). La demande de MEMS de ce type est de plus en plus en crois-

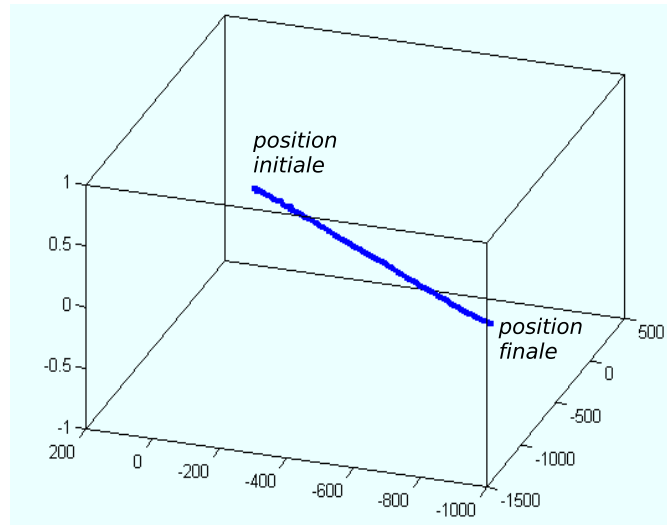


FIG. 6.18 – Trajectoire en ligne droite entre la position initiale et la position finale.

sance. L'intérêt des MEMS complexes et hybrides réside dans leur énorme capacité à intégrer plusieurs fonctions dans un volume relativement réduit. Nous nous sommes fixés le challenge d'assembler les cinq micro-objets illustrés par des pièces macrométrique sur la figure FIG. 6.19. Des microcomposants similaires à ceux utilisés pour valider les assemblages étudiés ci-dessus sont considérés. Toujours dans l'objectif d'aboutir à des MEMS solides, nous avons réalisé deux types de MEMS complexes. D'un côté, des MEMS qui tiennent sans moyen de fixation externe, et d'un autre côté nous avons assuré une fixation de type colle. La solidarisation se fait à travers une colle à polymérisation ultra-violets (UV). Nous aurons l'occasion de revenir sur cette partie dans la suite de ce chapitre.

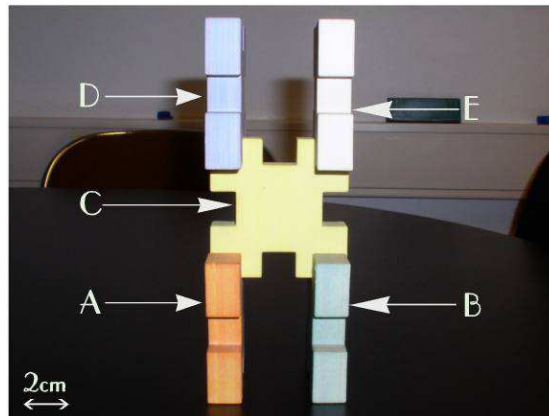


FIG. 6.19 – Illustration de l'assemblage visé avec des pièces macrométriques.

6.8.1 Notations

Soient les micro-objets **A**, **B**, **C**, **D** et **E** à assembler pour aboutir à la forme illustrée sur la figure FIG. 6.19. Les transformations homogènes entre le repère caméra \mathcal{R}_c et les différents repères liés aux positions désirées aux micro-objets sont respectivement ${}^c\mathcal{M}_{A^*}$, ${}^c\mathcal{M}_{B^*}$, ${}^c\mathcal{M}_{C^*}$, ${}^c\mathcal{M}_{D^*}$ et ${}^c\mathcal{M}_{E^*}$ (voir figure FIG. 6.20). Il a été mentionné ci-dessus (voir paragraphe 6.3.2), que nous avons tenté de définir les positions désirées à partir d'un assemblage réalisé en mode télé-opéré. Il s'est avéré que la réalisation de l'assemblage de manière précise, par un opérateur humain, est très difficile pour ne pas dire impossible. La figure FIG. 6.21 illustre une réalisation en mode télé-opéré. Il paraît évident que l'assemblage est loin d'être parfait.

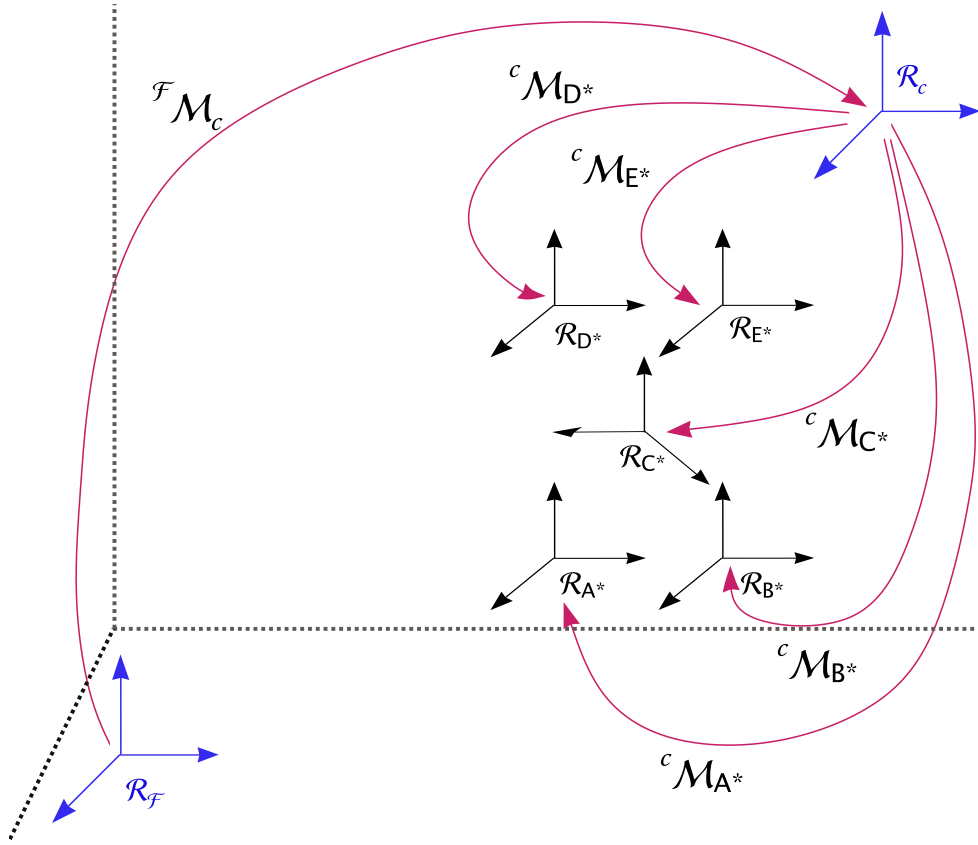


FIG. 6.20 – Repères liés à chaque micro-objet à assembler.

Plutôt que de définir toutes les positions désirées de tout le MEMS en mode télé-opéré, nous avons opté pour une autre méthode. Cette méthode consiste à déterminer seulement la position désirée ${}^c\mathcal{M}_{A^*}$ du micro-objet **A**, en mode télé-opéré et de déduire ${}^c\mathcal{M}_{B^*}$, ${}^c\mathcal{M}_{C^*}$, ${}^c\mathcal{M}_{D^*}$ et ${}^c\mathcal{M}_{E^*}$ par transformations rigides. Pour ce faire, notons les repères \mathcal{R}_{A^*} , \mathcal{R}_{B^*} , \mathcal{R}_{C^*} , \mathcal{R}_{D^*} et \mathcal{R}_{E^*} associés respectivement aux position désirées des micro-

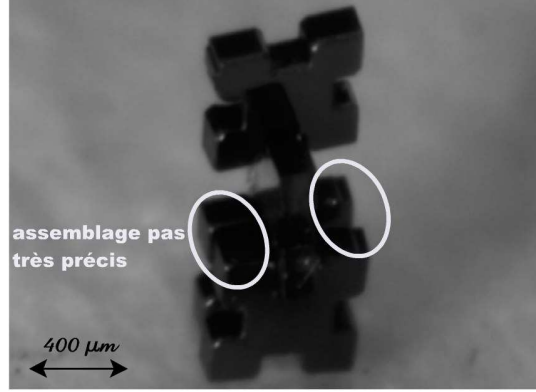


FIG. 6.21 – Micro-assemblage réalisé en mode télé-opéré.

objets **A**, **B**, **C**, **D** et **E**. Pour passer du repère \mathcal{R}_{A^*} vers le repère \mathcal{R}_{B^*} , il existe une matrice $\mathbf{M}_{(3 \times 4)}$ qui permet de passer de la position \mathbf{A}^* vers la position \mathbf{B}^* notée ${}^c\mathbf{M}_{A^*}^{B^*}$. De manière plus générale, on utilisera la notation suivante :

$${}^{\mathcal{F}}\mathbf{M}_i = {}^{\mathcal{F}}\mathbf{M}_{A^*} {}^{A^*}\mathbf{M}_i \quad (6.58)$$

avec **i** l'étiquette donnée à chaque microcomposant à considérer à l'instant t et ${}^{A^*}\mathbf{M}_i$ la matrice de passage entre la position désirée du micro-objet \mathbf{A}^* et le micro-objet **i** [**i** = **B**, **C**, **D**, **E**]. Ci-dessous, les différentes matrices de passages entre le repère \mathcal{R}_{A^*} et les autres repères \mathcal{R}_{B^*} , \mathcal{R}_{C^*} , \mathcal{R}_{D^*} et \mathcal{R}_{E^*} .

Le passage entre le repère \mathcal{R}_{A^*} vers le repère \mathcal{R}_{B^*} se traduit par une translation de $300 \mu\text{m}$ suivant l'axe vertical z . Elle est donnée par :

$${}^c\mathbf{M}_{A^*}^{B^*} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 300 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.59)$$

La matrice de passage du repère \mathcal{R}_{A^*} vers le repère \mathcal{R}_{C^*} se traduit par une rotation $\alpha = 90^\circ$ autour de l'axe z suivie de deux translations de $150 \mu\text{m}$ et $-250 \mu\text{m}$ respectivement suivant les axes x et y . Elle est donnée par :

$${}^c\mathbf{M}_{A^*}^{C^*} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -250 \\ -1 & 0 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.60)$$

La matrice de passage entre le repère \mathcal{R}_{A^*} vers le repère \mathcal{R}_{D^*} se traduit par une translation de $-500 \mu\text{m}$ suivant l'axe z . Elle est donnée par :

$${}^cM_{A^*}^{D^*} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -500 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.61)$$

Enfin, le passage entre le repère \mathcal{R}_{A^*} vers le repère \mathcal{R}_{E^*} est obtenu par deux translations de $-250 \mu\text{m}$ et $-500 \mu\text{m}$ respectivement suivant les axes x et y . La matrice de passage est donnée par :

$${}^cM_{A^*}^{E^*} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -250 \\ 0 & 1 & 0 & -500 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.62)$$

La figure FIG. 6.22 montre une phase intermédiaire du processus du micro-assemblage complexe. Elle représente la tâche qui correspond au tracking du micro-objet **C** et du positionnement de l'ensemble $[\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C}]$ à sa position désirée. Nous remarquons également la projection du modèle CAO des positions désirées. Ces positions sont calculées à partir de la position désirée du microcomposant **A** en utilisant les matrices de passage données par les relations (6.59), (6.60), (6.61) et (6.62).

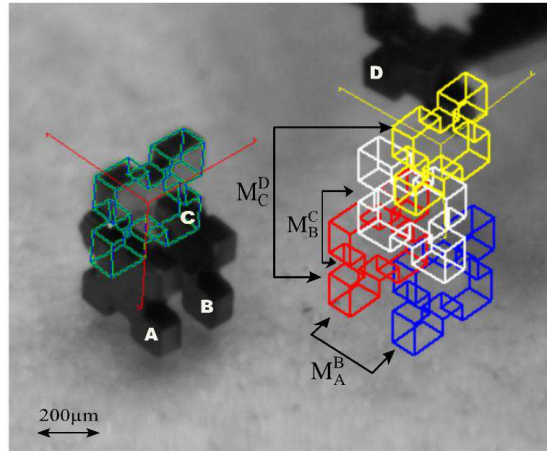


FIG. 6.22 – Phase intermédiaire d'un micro-assemblage complexe.

La commutation entre les différentes poses désirées s'effectue automatiquement. Une fois que le micro-objet **A** est parfaitement positionné sur sa position finale c'est-à-dire $\|e_t\| < 1 \mu\text{m}$ sur les axes de translation et $\|e_r\| < 0.5^\circ$ sur les axes de rotation, le processus commute pour réaliser la tâche suivante. Ainsi, la position désirée de la prochaine tâche (positionnement ou insertion) est déterminée à partir de la relation (6.58), ainsi de suite jusqu'à ce que l'assemblage soit terminé.

6.8.2 Sans moyens de solidarisation

Algorithm 2: Structure de l'algorithme utilisé pour l'assemblage d'un MEMS complexe.

```

début
  Initialisation du tracker
  pour tous les  $i = 1 : 5$  faire
1    si  $i = 1$  alors
      - tracking et positionnement planaire de A
      - saisie et placement de A
      - tracking et positionnement planaire de B
      - saisie de B
      commutation automatique vers la position désirée de B
2    si  $i = 2$  alors
      - tracking, positionnement spatial et placement de B
      - tracking et positionnement planaire de C
      - saisie de C
      commutation automatique vers la position désirée de C
3    si  $i = 3$  alors
      - tracking de A et positionnement planaire de [A+B]
      - tracking, positionnement et insertion de C dans [A+B]
      commutation automatique vers la position désirée de D
4    si  $i = 4$  alors
      - tracking et positionnement planaire de D
      - saisie de D
      - tracking de A, positionnement spatial et insertion de D dans
      [A+B+C]
      commutation automatique vers la position désirée de E
5    si  $i = 5$  alors
      - tracking and positionnement planaire de E
      - saisie de E
      - tracking de A et positionnement planaire de [A+B+C+D]
      - tracking E, positionnement spatial de E dans [A+B+C+D]
  fin

```

Dans cette section, nous verrons de plus près les différentes étapes de la réalisation de l'assemblage du MEMS 3D complexe visé. Le processus utilisé est décrit par l'algorithme [2]. Une certaine gamme d'assemblage a été choisie de manière à garantir au maximum la réussite du processus. Par exemple, le microcomposant **B** est placé devant **A** afin d'éviter d'éventuelles occultations de **B** par **A**. Ensuite, pour positionner l'ensemble **[A + B]**, c'est le micro-objet **B** qui est tracké. De même pour positionner l'ensemble **[A + B + C]**, c'est **C** qui sera tracké et ainsi de suite. D'autres gammes d'assemblage sont possibles, notamment par le choix du micro-objet à tracker. La conclusion à tirer

de cette pratique est que la gamme d'assemblage qui a le plus de chance d'aboutir est celle résumée dans l'algorithme [2].

Dans un premier temps, nous tentons une réalisation sans solidarisation extérieure. Ceci, en faisant confiance tout simplement à faiblesse de la tolérance d'insertion entre les micro-objets. S'il s'avère que le MEMS assemblé n'est pas suffisamment solide pour être, par exemple, transporté en dehors de la station de micro-assemblage sans qu'il soit endommagé, dans ce cas, nous mettrons en œuvre un moyen de fixation en utilisant une colle à réticulation par UV.

La figure FIG. 6.23 illustre une séquence d'images acquise par la caméra durant le processus d'assemblage du MEMS 3D complexe. La validation passe toujours par l'utilisation des micro-éléments de $400 \times 400 \times 100 \mu\text{m}^3$. L'image 6.23.(a) illustre la première étape du processus en l'occurrence le tracking et le positionnement du micro-objet **A**. L'image 6.23.(b) montre la phase de tracking de **B** pour le positionner à côté de **A**, positionné préalablement. L'image 6.23.(c) représente la fin de la tâche qui consiste à positionner l'ensemble $[\mathbf{A} + \mathbf{B}]$, ceci en trackant **B**. Quant à l'image 6.23.(d), elle illustre le tracking de **C** pour l'insertion dans $[\mathbf{A} + \mathbf{B}]$. L'image 6.23.(e) montre la phase finale de la tâche de positionnement de l'ensemble $[\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C}]$, ceci en trackant **B**. L'insertion de la quatrième pièce, c'est-à-dire **D**, est illustrée sur l'image 6.23.(f). Enfin, le processus d'assemblage se termine par l'insertion du micro-objet **E** dans l'ensemble $[\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} + \mathbf{D}]$, voir l'image 6.23.(g). Un zoom sur le MEMS 3D qui vient d'être réalisé est illustré sur l'image 6.23.(h). Bien évidemment, nous avons choisi dans la séquence vidéo, les images les plus représentatives du processus d'assemblage afin de mieux comprendre son déroulement.

Remarque : à partir de la comparaison entre le MEMS 3D réalisé en mode télé-opéré (avec une certaine expérience d'utilisation de la station SAMMI) et le MEMS réalisé de manière automatique, nous constatons que la deuxième réalisation est remarquablement meilleure que la première au niveau précision et solidité. Malgré l'utilisation d'un joystick, il s'avère que nous n'avons pas une résolution suffisamment bonne, au niveau du poignet, pour faire ce genre d'assemblage aisément. Voici, un autre grand intérêt de l'approche automatisée présentée dans ce manuscrit. Le micro-assemblage par commande référencée capteur de vision est capable de s'affranchir des limitations imposées par le mode télé-opéré et encore davantage par le mode manuel.

6.8.3 Précision et solidité

Pour ce qui est de la précision, c'est une surprise de ne pas avoir la même précision que celle avancée dans la section [6.7]. La précision reste suffisamment élevée pour permettre de faire des insertions telles que celle montrée sur la figure FIG. 6.24. Après une insertion d'un micro-objet dans un autre, l'ensemble des deux micro-objets peut être déplacé en saisissant le micro-objet supérieur. Dans le meilleur des cas, les erreurs moyennes en translation et en rotation peuvent atteindre, respectivement, $0.3 \mu\text{m}$ et 0.2° . Par consé-

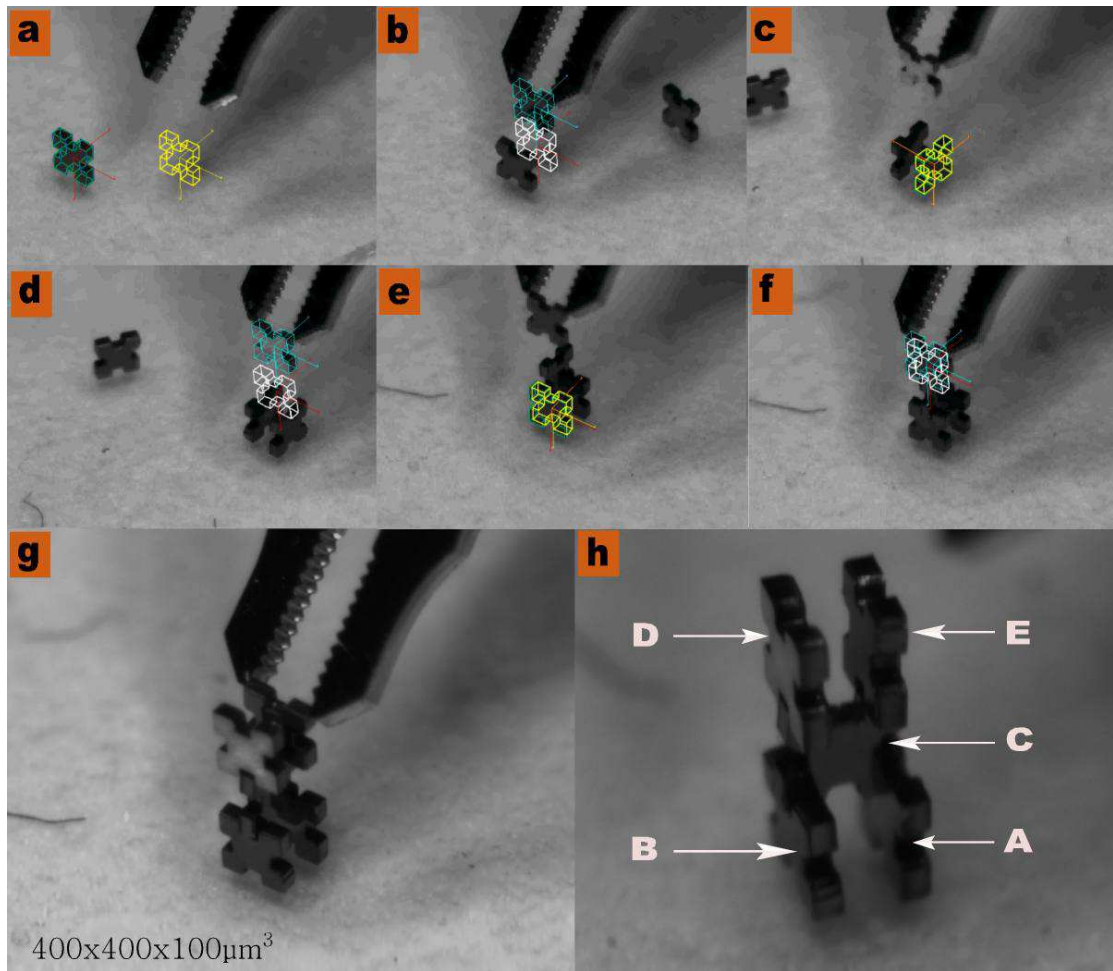


FIG. 6.23 – Séquence d'images acquises durant l'assemblage d'un MEMS complexe sur trois niveaux par l'approche PBVS.

quent, la solidité des MEMS complexes assemblés reste prometteuse. Néanmoins, elle est insuffisante quand il s'agit d'un MEMS sur trois niveaux. Celui-ci est difficilement transportable en dehors de la station d'assemblage bien qu'il tienne parfaitement sur le support d'assemblage.

Remarque : La micropince équipée d'organes terminaux en silicium, utilisée pour l'assemblage des microsystèmes sur deux niveaux a été repensée. Pour l'assemblage de structures 3D beaucoup plus complexes (MEMS sur 3 niveaux), il est préférable d'avoir un gripper ayant une meilleure force de blocage. C'est dans cet objectif que les organes terminaux qui équipent la pince MOCC sont, à présent, en nickel. Ils sont plus adaptés pour réaliser des insertions de plus en plus serrées.

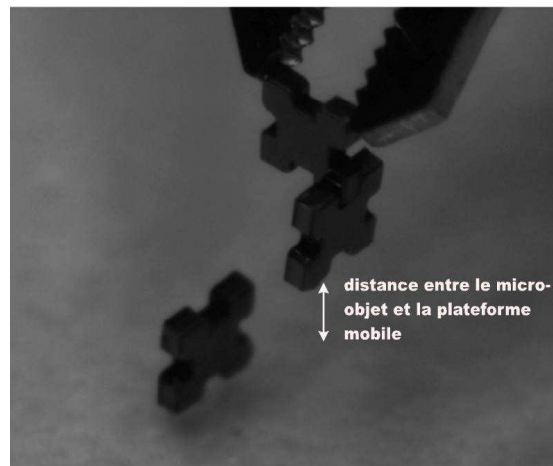


FIG. 6.24 – Illustration de la solidité d'un assemblage (sans solidarisation) de deux microcomposants.

6.8.4 Avec solidarisation à l'aide d'une colle UV

La solidarisation des microsystemes assemblés est un grand défi. Il faut à la fois trouver une technique de fixation efficace, rapide, peu coûteuse, réversible et résistante aux éventuelles conditions de fonctionnement extrêmes des MEMS (basses et hautes températures, humidité, ...). Après une étude approfondie des systèmes de fixation existants, nous avons opté pour un système de solidarisation de type colle mais pas par n'importe quelle colle. La colle doit avoir une polymérisation contrôlée, une bonne viscosité, une faible capillarité, une absence de solvant, etc. C'est en respectant ce cahier des charges que nous avons choisi une colle spéciale qui est une colle UV. La colle UV *628-VLV* de chez *Dymax* présente les bonnes propriétés pour ce genre d'application. Les points forts de cette colle sont sa capacité à solidariser des matériaux hybrides (le cas des MEMS) de manière efficace, une polymérisation sous UV en cinq secondes, une excellente viscosité (des doses de quelques microlitres sont possibles), une bonne résistance aux changements de température. Comme il a été mentionné ci-dessus, la colle UV ne réticule qu'en présence d'un rayonnement d'ultra-violets d'une longueur d'onde précise et avec une certaine puissance. À cet effet, une lampe UV *BlueWave 50* de chez *Dymax* caractérisée par une longueur d'onde de rayonnement de 365 nm pour une puissance de $3\text{W}/\text{cm}^2$, est utilisée (FIG. 6.26). Elle est directement intégrable sur la station SAMMI (FIG. 6.25). Le système de collage peut fonctionner de deux manières : actionnement du rayonnement UV à l'aide d'une pédale (commande manuelle) ou contrôle par une *minuterie*⁷ préprogrammée (commande informatique).

Le processus de micro-assemblage (sans collage) décrit précédemment est modifié pour rajouter les tâches de fixation par collage. Deux tâches sont alors adjointes. Tout

⁷timer, de l'anglais



FIG. 6.25 – Photographie du système de collage à UV.

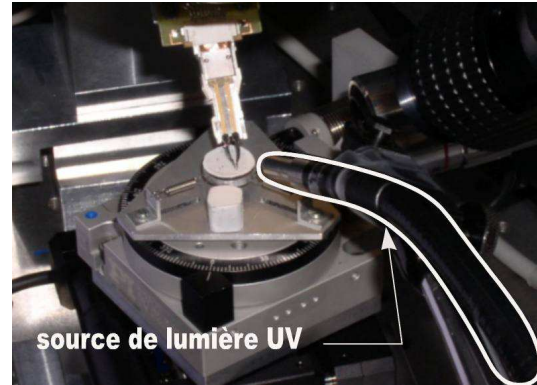


FIG. 6.26 – Intégration du système de collage à UV sur la station SAMMI.

d'abord, prendre un micro-objet pour tremper une petite partie (partie inférieure) dans la colle (la colle est disposée sur une plaquette en verre). Une fois le micro-objet inséré, un spot de lumière ultra-violet est envoyé sur la partie insérée pour la réticulation de la colle.

Désormais, l'approche d'assemblage de MEMS sans solidarisation se fait de manière autonome (avec les approches développées dans ce chapitre). Par contre, le micro-assemblage intégrant l'étape de collage, se déroule en mode semi-automatique. Les deux dernières tâches intégrées au processus de micro-assemblage, automatique, en l'occurrence, tremper le micro-objet dans la colle et actionner la lampe UV, se font avec l'intervention de l'opérateur humain. Les autres tâches (positionnement, insertion, etc.) restent en mode automatique. Il sera intéressant donc de compléter le processus semi-automatique pour en faire un processus complètement autonome. Cela en automatisant la tâche *tremper le microcomposant dans la colle* par asservissement visuel. Dans ce cas, on définira une position désirée \mathbf{s}_c^* sur la plaquette de verre (où la colle est disposée) pour boucler la commande entre la position courante \mathbf{s}_c du micro-objet et la position désirée. Pour ce qui est de l'actionnement du spot UV, il faut prévoir l'envoi d'un signal à la lampe indiquant la fin de l'insertion du micro-objet.

6.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un panel de travaux pour réaliser l'assemblage de MEMS. À partir de la bibliothèque de tracking 3D VISP, nous avons développé une loi de commande par asservissement 3D qui permet de réaliser des assemblages de microsystemes 3D avec une très grande précision et une excellente répétabilité et ceci avec des temps de cycle relativement intéressants. Il faut moins d'une minute (40 secondes en moyenne) pour assembler un MEMS sur deux niveaux. La série de micro-assemblage réalisée, nous a permis de valider les techniques développées et de choisir celle ou celles qui conviennent le mieux. Deux approches sont développées, l'approche single

tracking (les 5 ddl sont commandés de manière séquentielle, les 3 ddl de la plateforme de positionnement d'abord ensuite les 2 ddl du micromanipulateur) et l'approche dual tracking (les 5 ddl sont commandés simultanément). Il s'est avéré que le single tracking est plus intéressant en terme de temps de cycle. La solidité obtenue grâce à la faible tolérance d'insertion ($< 3 \mu\text{m}$) a permis d'aboutir à des microsystèmes sur deux niveaux suffisamment solides pour être transportés en dehors de la station de micro-assemblage et cela sans les endommager. Une extrapolation de ces approches a été étudiée pour aller vers des micro-assemblages beaucoup plus complexes intégrant davantage de composants dans le processus d'assemblage. Pas moins de cinq micro-objets ont été assemblés de manière automatique (toujours par asservissement visuel 3D), ceci sur 3 niveaux. De même pour que les MEMS à deux niveaux, la précision, la répétabilité, la solidité et le temps de cycle ont été les critères de validation. Dans l'ensemble, une bonne solidité a été obtenue malgré la complexité de la tâche. Cependant, pour transférer les MEMS (assemblés sur 3 niveaux) de la station de micro-assemblage vers un magasin de stockage par exemple, il faut davantage de solidité. Pour ce faire, un système de collage à UV a été choisi pour apporter une seconde fixation extérieure plus sûre. Ainsi, le processus d'assemblage a été légèrement modifié pour intégrer deux nouvelles tâches qui consistent, premièrement à tremper le micro-objet dans la colle UV et deuxièmement, à actionner le rayonnement UV pour polymériser la colle. Ces deux dernières tâches sont exécutées par un opérateur humain mais peuvent être automatisées à l'avenir. D'autres points forts des travaux décrits dans ce chapitre méritent d'être soulignés, notamment sur la faisabilité de réaliser des structures complexes par asservissement visuel "pratiquement" irréalisables par un opérateur humain. C'est le cas des MEMS sur 3 niveaux assemblés. De manière plus générale, les idées, les techniques et les outils décrits dans ce chapitre peuvent trouver application dans l'industrie des MEMS. Un secteur qui souffre toujours de l'absence de méthodes robustes, rapides, précises, flexibles, capables de baisser les coûts d'assemblage des MEMS pour les rendre rentables.

Conclusion et perspectives

Ce chapitre présente la conclusion générale de l'ensemble des travaux effectués pendant ces trois années de thèse. Il présente les apports dans chaque thématique étudiée ainsi que les perspectives à court, moyen et long termes.

7.1 Conclusion générale

Pour s'affranchir de la forte dépendance de l'intervention d'un opérateur humain dans les tâches de micromanipulation et de micro-assemblage, un travail profond doit être mené, ceci, dans l'objectif de rendre de plus en plus autonomes, les stations micro-robotiques. Rendre ces stations autonomes exige un travail de longue haleine, tant au niveau des thématiques de recherche que des développements technologiques. Les thématiques de recherches vont aller de la compréhension des phénomènes qui régissent le micromonde (forces surfacique) jusqu'à l'automatisation des tâches de micromanipulation et de micro-assemblage. L'effort à mener sur les développements technologiques peut se résumer à trouver des solutions matérielles ou logicielles pour améliorer les performances des stations de micro-assemblage en terme de précision, répétabilité, rapidité, flexibilité, etc. Parmi les nombreuses thématiques de recherche qui gravitent autour du développement des MEMS, nous nous sommes intéressés, de manière générale, à l'intégration des capteurs de vision sur une station de micro-assemblage et, de manière plus précise, à la commande référencée vision. La visualisation d'objets micrométriques est assurée par des imageurs à fort ou à très fort grandissement, en l'occurrence les microscopes optiques. Environ la moitié des stations de micro-assemblage existantes sont équipées d'un système de vision distribué (plusieurs microscopes optiques sont utilisés) pour multiplier les vues autour de l'espace de travail, l'autre moitié est équipée d'un seul microscope optique (souvent, il s'agit d'un stéréomicroscope). Le microscope optique s'avère le meilleur moyen d'observer et de contrôler le déroulement des tâches de micromanipulation et de micro-assemblage. Ceci dit, l'utilisation de ce genre d'imageur pose quelques problèmes par rapport à celle d'un imageur conventionnel. L'utilisation de lentilles à fort grandissement engendrent des contraintes et des limitations comme :

la faible profondeur de champ, le faible champ de vision, la faible distance de travail, le faible contraste des images microscopiques, la dépendance de qualité de l'éclairage, etc. Ainsi, les connaissances de la vision par ordinateur, le traitement d'images, la modélisation et bien évidemment l'asservissement visuel doivent être repensés profondément à l'échelle micrométrique. Les travaux présentés dans ce manuscrit sont, en quelque sorte, des réponses à ces problématiques.

Tout d'abord, le calibrage d'un microscope optique pose un problème. Malgré certaines similitudes avec un imageur conventionnel, la modélisation d'un microscope optique reste différente, que ce soit au niveau du moyen (mire) de calibrage que de la formulation du modèle, notamment au niveau des paramètres intrinsèques. Une méthode de calibrage multi-échelle d'un microscope équipé d'un zoom dynamique a été proposée. L'élaboration de cette méthode va de la conception des mires (mire réelle et mire virtuelle) de calibrage à la formulation du modèle multi-échelle du microscope optique. Nous avons donc concentré nos efforts sur la modélisation (auto-calibrage multi-échelle) d'un microscope optique de type Leica MZ16A. Une relation a été établie entre la position du zoom ζ et la longueur focale f pour avoir une matrice des paramètres intrinsèques \mathbf{K} adaptative pour chaque valeur de ζ . Les apports scientifiques concernant l'auto-calibrage multi-échelle sont inscrits dans le chapitre [3].

L'ensemble des travaux présentés dans ce manuscrit ont pour finalité la manipulation et l'assemblage de micro-systèmes. Les micro-objets ont une dimension micrométrique et il en est de même pour les organes terminaux du gripper utilisés pour la préhension. La bonne maîtrise de la saisie des micro-objets passe par le bon alignement des doigts de la micropince avant chaque début de cycle de manipulation. Aligner parfaitement les organes terminaux de la micropince permet d'éviter les mauvaises surprises (torsion et orientations spatiales non-contrôlées) lors du serrage du micro-objet. Cependant, le parfait alignement pose problème. C'est pour répondre à cette problématique qu'ont été menés les travaux inscrits dans le chapitre [4] qui consistent à procéder à une reconstruction 3D des organes terminaux par vision. À partir de la forme 3D des doigts de la pince, il devient possible de calculer la pose 3D de chaque doigt pour ainsi les aligner. L'apport scientifique se situe au niveau de l'utilisation de la faible profondeur de champ du microscope optique qui devient pour nous un avantage. Pour ce faire, nous procédons de la manière suivante : un scan de la scène est effectué avec le déplacement du microscope (le pas peut être choisi en fonction des besoins : faible pour une haute précision et important pour un meilleur temps de calcul) suivant l'axe optique du microscope. À chaque incrément, une image est acquise et traitée pour déterminer les pixels ayant un fort degré de netteté. Dans un premier temps, chaque pixel est comparé, dans la même image, à ses voisins en calculant sa variance. Dans un second temps, chaque pixel jugé net doit être comparé à ses voisins se trouvant à la même position suivant l'axe vertical du scan. Des filtres (filtre gaussien et filtre utilisant la méthode d'analyse en composantes principales) sont implémentés pour filtrer les mauvaises détections pour ne garder que les véritables pixels nets. Enfin, les pixels ayant reçu l'étiquette nette, sont mis ensemble pour remonter à la forme 3D des micro-objets ou des organes terminaux de la micropince.

Une fois la forme 3D des doigts acquise, il suffit de déterminer la pose 3D de ces derniers pour pourvoir parfaitement les aligner.

La deuxième partie du manuscrit a été consacrée à la commande référencée capteur de vision. Le chapitre [5] traite du problème de la manipulation automatisée de micro-objets en silicium en utilisant une commande de type asservissement visuel 2D multi-échelle. Nous avons utilisé les résultats du calibrage multi-échelle présentés dans le chapitre [3] pour implémenter ce type de loi de commande. L'apport scientifique réside dans l'utilisation d'un seul microscope optique pour réaliser des cycles de micromanipulation de type pick and place à haute précision. L'idée est de partir d'un grandissement faible (vue globale de la scène, donc résolution faible) vers un fort grandissement (vue locale, donc haute résolution) lorsque le micro-objet s'approche de sa cible (entre les doigts de la pince). Pour réaliser cette tâche, la commande du zoom est intégrée dans la loi de commande. Il reste néanmoins le problème de la profondeur de la scène Z^* . La profondeur Z^* est calculée à partir d'une méthode appelée depth from focus. Une autre application est adjointe à la commande. Elle consiste dans le tracking du gripper par la caméra (microscope) durant les tâches de micromanipulation. Grâce à cette application, il est possible de garder le micro-objet saisi dans le plan de la mise au point du microscope. Par ailleurs, des critères de validation des approches ont été posés pour évaluer les performances du cycle de pick and place implémenté. Pour ce faire, ce cycle a été répété à plusieurs reprises. Un taux de réussite de 72 % a été obtenu. Les échecs sont principalement causés par les effets d'adhésion, les effets électrostatiques (entre les doigts de la pince et le micro-objet) mais également à cause d'autres effets non physiques comme les occultations. Les occultations s'expliquent par le passage du micro-objet sous les doigts du gripper lors de la tâche de positionnement. Pour remédier à ce problème, une planification et un suivi de trajectoire ont été développés. Ces méthodes reposent sur l'utilisation des champs de potentiels artificiels pour éloigner le micro-objet des doigts du préhenseur. Une fois que la trajectoire est définie, elle est paramétrée en utilisant les courbes de Bézier. Le suivi de trajectoire consiste à associer un terme de trainage au terme de régulation dans la loi de commande par asservissement visuel 2D.

Souvent lorsqu'il s'agit de réaliser des tâches de positionnement dans l'espace, il est difficilement envisageable d'utiliser une loi de commande dans l'image (AV2D). Avec un modèle de projection parfaitement établi avec une grande précision, une commande de ce type est probable. Cependant, il est difficile d'obtenir un modèle très précis notamment lorsqu'il s'agit d'un imageur tel que le microscope optique. Certes, le modèle du microscope optique décrit dans ce manuscrit est précis, cependant nul ne garantit sa précision dans le temps. Il est plus judicieux de s'affranchir de cette contrainte par une loi de commande de type asservissement visuel 3D.

Pour l'assemblage de MEMS 3D à la fois simple (sur deux niveaux) et complexe (sur trois niveaux), un asservissement visuel 3D a été développé. Les apports scientifiques des travaux décrits dans le chapitre [6] se situent dans :

- L'utilisation de ce type de loi de commande dans le micromonde. La faible profondeur de champ des microscopes optiques contribue à limiter l'utilisation des lois de commande de ce type,
- L'utilisation d'une seule vue pour réaliser le tracking des micro-objets et la commande 3D. Ceci est possible grâce à l'utilisation de la bibliothèque de tracking "ViSP" [MSC05],
- La très bonne précision obtenue durant les tâches de micro-assemblage. Elle atteint $0.3 \mu\text{m}$ en translation et 0.2° en rotation,
- La bonne répétabilité au niveau des processus de micro-assemblage. Sur deux séries de dix micro-assemblage, un taux de réussite de 100 % a été obtenu.
- La bonne solidité des MEMS 3D assemblés, ceci grâce à une faible tolérance d'insertion entre deux micro-objets ($< 3 \mu\text{m}$),
- Le court temps de cycle nécessaire pour réaliser un assemblage (40.8 secondes en moyenne),
- La complexité de certains MEMS assemblés, pas moins de 5 micro-objets sont assemblés sur 3 niveaux de manière automatique.

Lorsqu'il est question de MEMS sur deux niveaux, la solidité reste suffisamment bonne pour que les MEMS assemblés soient transférables de la station de micro-assemblage vers une zone de stockage. Cependant, les MEMS complexes sur trois niveaux montrent des limites de solidité lors du transfert. Une technique de collage est alors associée aux approches de commande développées pour solidariser davantage ce type de MEMS. La colle utilisée est une colle à réticulation par rayonnement ultra-violet.

Le manuscrit décrit trois années de travaux sur l'automatisation d'une station de micro-assemblage en utilisant un capteur de vision de type microscope optique. C'est la première thèse dans le domaine réalisée au sein du département AS2M de l'institut FEMTO-ST. Ces travaux nous ont permis, certes, d'ouvrir une thématique innovante au sein de notre département mais également de bien nous positionner au sein de la communauté scientifique internationale traitant de la problématique de la commande dans le micromonde.

La résolution des problématiques définies dans les perspectives constituerait un apport indéniable aux travaux déjà réalisés. Ceci permettrait sans doute d'ouvrir vers de nouvelles orientations scientifiques.

7.2 Perspectives

De nombreuses perspectives de recherche peuvent être menées à partir de ces travaux. Nous pouvons les classer dans le temps de la manière suivante :

7.2.1 Perspectives à court terme

La méthode de calibrage présentée dans le chapitre [3] peut être étendue vers une méthode plus complète. En effet, comme il a été mentionné auparavant, une bonne partie des stations de micro-assemblage sont équipées de stéréomicroscopes optiques (comme c'est le cas sur la station SAMMI), il serait donc intéressant de calibrer les deux chemins optiques dont disposent l'imageur. Alors la méthode de reconstruction 3D présentée dans le chapitre [4] pourrait être remplacée par une méthode de reconstruction 3D basée sur la stéréovision. L'asservissement visuel par stéréovision (très peu étudié dans le micromonde) pourrait être également une solution pour la micromanipulation et le micro-assemblage de MEMS. Enfin, il serait réellement intéressant de trouver des applications industrielles sur l'assemblage de MEMS en utilisant l'ensemble des approches décrites dans ce manuscrit.

7.2.2 Perspectives à moyen terme

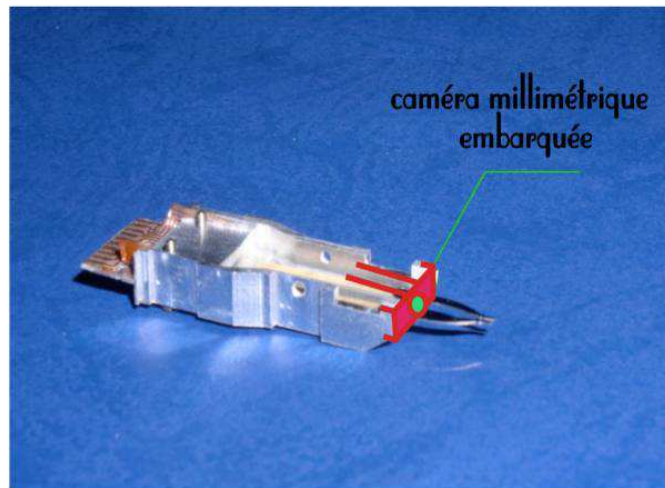


FIG. 7.1 – Futur design du gripper MMOC équipé d'une microcaméra embarquée.

La commande actuelle en fermeture du gripper pour la saisie des micro-objets n'est sûrement pas l'idéal. La tâche *saisie* est une tâche clé en micro-assemblage, d'où l'intérêt de bien maîtriser celle-ci. Une commande hybride force/vision est une solution à considérer. Cependant, en l'absence de capteur d'efforts sur le gripper MMOC, cette solution reste impossible. Une autre solution intéressante consisterait à disposer un imageur ou plutôt un micro-imageur au plus près du gripper (avec une très bonne résolution) de façon à visualiser le mouvement des doigts lors de la saisie. À cet effet, nous travaillons, en ce moment, en collaboration avec le Laboratoire LE2I de l'Université de Bourgogne sur l'intégration d'une microcaméra sur le MMOC, comme il est illustré sur la figure FIG. 7.1. Un capteur d'image type CMOS est en cours d'essai d'intégration sur

le gripper. Si l'intégration s'avère faisable avec une bonne qualité d'image et que des lois de commande référencée microcapteur de vision sont développées, ceci constituerait une avancée importante dans le domaine du micro-assemblage de MEMS.

7.2.3 Perspectives à long terme

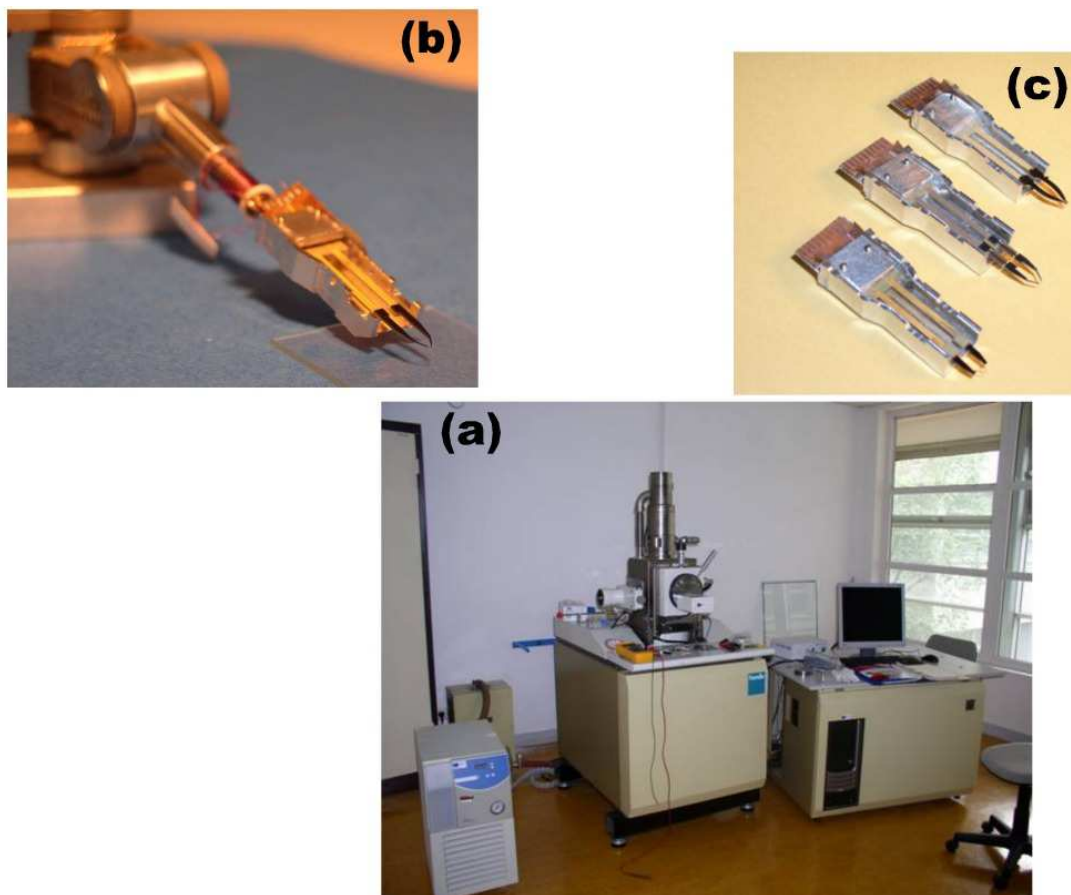


FIG. 7.2 – Micromanipulateur (Kleindiek) à 3 ddl à l'intérieur d'un MEB.

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont permis d'ouvrir une nouvelle thématique au sein de notre département. Cette nouvelle thématique va s'orienter aussi vers la nanomanipulation et le nano-assemblage de NEMS par asservissement visuel. Nous aurions envie de descendre sous la barre symbolique du micromètre. Aller encore et encore vers l'infiniment petit nourrit les curiosités des chercheurs depuis peu de temps. À l'échelle nanométrique, les modèles, les connaissances, les stratégies et les approches développées dans le domaine de micromanipulation devront être reconsidérés. Aux phénomènes mécaniques, difficilement compréhensibles dans le micromonde, viennent s'ajouter les phénomènes de la physique quantique. Par ailleurs, l'utilisation de l'imagerie microscopique

n'est plus viable à ces échelles, principalement à cause de sa limitation en résolution. Il conviendra alors d'utiliser un microscope électronique à balayage (FIG. 7.2.(a)) pour la nanomanipulation et le nano-assemblage de NEMS. Dans un premier temps, il est plus que nécessaire d'aller vers des approches de traitement du signal et des images pour obtenir un bon rapport signal/bruit ainsi qu'un bon compromis entre la vitesse et la qualité d'acquisition du MEB. Il en est de même pour ce qui concerne la modélisation (calibrage) d'imageur tel que le MEB qui possède une projection non perspective mais parallèle avec des distorsions géométriques. Les approches par asservissement visuel (respectivement les méthodes de tracking) sont également à reconsidérer. Très peu de travaux dans la littérature traitent de la problématique de la commande par retour visuel en utilisant un MEB.

La partie mécanique en cours d'installation dans le MEB comporte une table de positionnement à 3 ddl ($xy\theta$) à très haute précision et un micromanipulateur à 3 ddl ($z\phi\beta$) du type Kleindiek (FIG. 7.2.(b)). Ce micromanipulateur, qui possède d'excellente performance au niveau résolution, est monté le gripper MMOC. Le MMOC sera équipé de nouveaux organes terminaux adaptés à la manipulation à l'échelle nanométrique. Il sera sans doute indispensable de proposer des lois de commande suffisamment robustes par rapport à deux phénomènes. Le premier phénomène concerne les importantes vibrations engendrées par le MEB une fois mis en marche. Une commande de type H_∞ serait *peut être* une solution à considérer. Il en sera de même pour les vibrations des différents ddl du micromanipulateur, ces vibrations sont de faibles amplitudes mais à l'échelle nanométrique, elles deviennent problématiques.

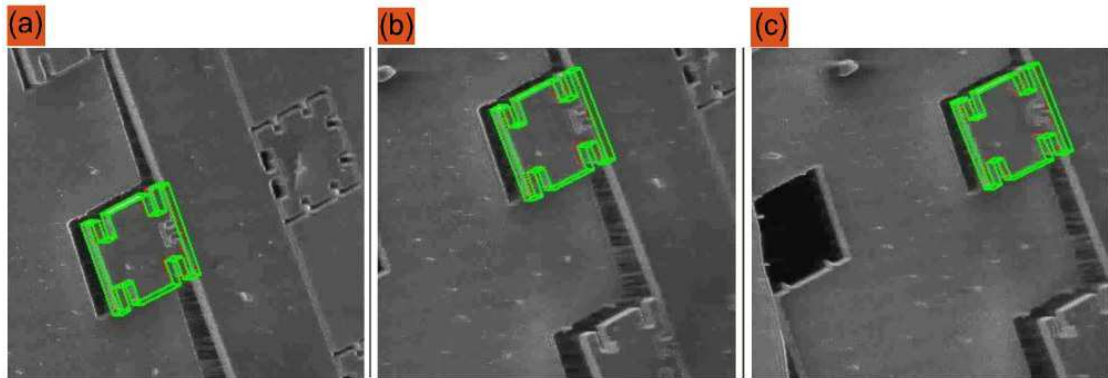


FIG. 7.3 – Tracking d'un micro-objet sous le MEB.

Les premiers travaux réalisés dans le MEB ont consisté à suivre un micro-objet en utilisant le tracker ViSP. Il s'est avéré que le tracker arrive à suivre le micro-objet, mais il serait certainement plus performant en prenant en compte dans les équations non plus un modèle perspective mais plutôt un modèle parallèle.

Bibliographie

- [ACJ⁺97] Santos A., Solorzano CO., Vaquero JJ., Pena JM., Malpica N. et Pozo F. : Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic analysis. *Journal of Microscopy*, 188:264–272, 1997. [75](#), [76](#), [77](#)
- [Ada90] M. ADAMSON, A. : Physical chemistry of surfaces, fifth edition. *Wiley Interscience publication*, 1990. [44](#)
- [AF07] Mehdi AMMI et Antoine FERREIRA : Robotic assisted micromanipulation system using virtual fixtures and metaphors. In *IEEE International Conference Robotics and Automation*, pages 454–460, Roma, Italy, 2007. [145](#)
- [AFF05] Mehdi AMMI, Vincent FREMONT et Antoine FERREIRA : Flexible microscope calibration using virtual pattern for 3-d telemicromanipulation. In *IEEE International Conference Robotics and Automation*, pages 3855–3904, Barcelona, Spain, avril, 2005. [xviii](#), [58](#), [59](#), [64](#)
- [Agi77] G.J. AGIN : Servoing with visual feedback. In *Proc. of 7th Int. Sympo. on Industrial Robotics*, Tokyo, Japan, Octobre 1977. [104](#)
- [AGi79] G.J. AGIN : Real-time control of a robot with mobile camera. *Technical Note 179, SRI International*, Février 1979. [104](#)
- [AMH⁺03] Kanna AOKI, Hideki T. MIYAZAKI, Hideki HIRAYAMA, Kyoji INOSHITA, Toshikiko BABA, Kazuaki SAKODA, Norio SHINYA et Yoshinobu AOYAGI : Microassembly of semiconductor three-dimensional photonic crystals. *Nature Materials*, vol. 2 (2):117–121, 2003. [112](#)
- [ANC05] J. AGNUS, P. NECTOUX et N. CHAILLET : Overview of microgrippers and design of a micromanipulation station based on mmoc microgripper. In *IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pages 117–123, Finland, 2005. [122](#)
- [AP63] M. J. ADAMS et V. PERCHARD : The cohesive forces between particles with interstitial liquid. *International Chemistry E. Symposium series*, (91):147–160, 1963. [44](#)

- [ASB07] M. ARON, G. SIMON et M.-O. BERGER : Use of inertial sensors to support video tracking. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 18(1):57–68, 2007. 101
- [AYTM93] P. K. ALLEN, B. YOSHIMI, A. TIMCENKO et A. MICHELMAN : Automated tracking and grasping of a moving object with a robotic hand-eye system. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 9 (2):152–165, avril 1993. 101
- [BDLP07] J. BERT, S. DEMBÉLÉ et N. LEFORT-PIAT : Performing weak calibration at the microscale, application to micromanipulation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4937–4942, Roma, Italy, April, 2007. 57
- [BDSNC07] M. A. BASHA, N. DECHEV, S. SAFAVI-NAEINI et S. K. CHAUDHURI : A scalable 1xn optical mems switch architecture utilizing a microassembled rotating micromirror. *IEEE Journal of Selecter Topics in Quantum Electronics*, 13(2), avril 2007. 112
- [Ber07] Julien BERT : *Synthèse de vues à partir d’images de microscopes photoniques pour la micromanipulation*. Thèse de doctorat, Laboratoire d’Automatique de Besançon (LAB-CNRS), Université de Franche-Comté, octobre 2007. xxxiii, 8, 41
- [Bey92] H.A. BEYER : Accurate calibration of ccd-cameras. In *International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 96–101, Illinois, USA, 1992. 64
- [BF04] McCullagh B. et Shevlin F. : Coplanar camera calibration with small depth of field lens. In *The Irish Machine Vision and Image Processing Conference*, pages 129–134, Dublin, Irish, september, 2004. 34, 57
- [BM04] S. BENHIMANE et E. MALIS : Real-time image-based tracking of planes using efficient second-order minimization. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots Systems*, volume 1, pages 943–948, Sendai, Japan, october 2004. 114
- [BM07] S. BENHIMANE et E. MALIS : Homography-based 2d visual tracking and servoing. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 26, No. 7:pp. 661–676, 2007. 114
- [BN04] K. BERK YESIN et B. NELSON : Robust cad model-based visual tracking for 3d microassembly using image space potentials. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 1868–1873, New Orleans, USA, 2004. 145
- [Bou98] J. Y. BOUGUET : Complete camera calibration toolbox for matlab. In <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj>, Pasadena, California, USA, 1998. 60
- [Bou08] O. BOURQUARDEZ : *Commande d’engins volants par asservissement visuel*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Mention traitement du signal et télécommunications, Février 2008. 101

- [Bow86] R. BOWLING : A theoretical review of particle adhesion. *In Symposium on particules on surface 1 : Detection, Adhesion and Removal*, pages 129–142, San Francisco, USA, 1986. [44](#), [45](#)
- [BPB99] N. BADLER, M. PALMER et R. BINDIGANAVALE : Animation control for real-time virtual humans. *Communications of the ACM*, 42(8):64–73, august 1999. [101](#)
- [CAD95] C. COLOMBO, B. ALLOTTA et P. DARIO : Affine visual servoing : a framework for relative positioning with a robot. *In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 464–471, Nagoya, Japan, 1995. [107](#)
- [CBN⁺98] Michael B. COHN, Karl F. BOHRINGER, J. Mark NOWOROLSKI, Angad SINGH et Chris G. KELLER : Microassembly technologies for mems. *In SPIE Vol. 3513. Microelectronic structures and MEMS for optical processing IV. Santa Clara, CA. September, 1998*. [xiv](#), [21](#), [23](#)
- [CGdMF06] L. CUVILLON, J GANGLOFF, M. de MATHELIN et A. FORGIONE : Towards robotized beating heart tecabg : assessment of the heart dynamics using high-speed vision. *Computer Aided Surgery*, 11(5):267 – 277, September 2006. [101](#)
- [Cha90] François CHAUMETTE : *La relation vision-commande : théorie et application à des tâches robotiques*. Thèse de doctorat, Université de Rennes I, Institut de Formation Supérieure en Informatique et Communication, Juillet 1990. [105](#), [117](#)
- [Cha97] F. CHAUMETTE : Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing. *In D.J. KRIEGMAN, G. HAGER et A.S. MORSE, éditeurs : The confluence of vision and control*, Lecture Notes in control and information sciences, No 237, pages 67–78. Springer, 1997. [105](#)
- [Cha02] F. CHAUMETTE : Asservissement visuel. *In W. KHALIL, éditeur : La commande des robots manipulateurs*, Traité IC2, chapitre 3, pages 105–150. Hermès, 2002. [158](#)
- [CMC03a] A.I. COMPORT, E. MARCHAND et F. CHAUMETTE : A real-time tracker for markerless augmented reality. *In ACM/IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, ISMAR'03*, pages 36–45, october 2003. [106](#)
- [CMC03b] A.I. COMPORT, E. MARCHAND et F. CHAUMETTE : Robust and real-time image-based tracking for markerless augmented reality. Rapport technique 1534, IRISA, Avril 2003. [157](#)
- [CMC04] A.I. COMPORT, E. MARCHAND et F. CHAUMETTE : Robust model-based tracking for robot vision. *In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'04*, volume 1, pages 692–697, Sendai, Japan, 2004. [157](#)
- [CMPC06] A.I. COMPORT, E. MARCHAND, M. PRESSIGOUT et F. CHAUMETTE : Real-time markerless tracking for augmented reality : the virtual visual servoing framework. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 12(4): 615–628, juillet 2006. [158](#), [160](#), [161](#)

- [CPMC03] A.I. COMPORT, M. PRESSIGOUT, E. MARCHAND et F. CHAUMETTE : A visual servoing control law that is robust to image outliers. *In IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'03*, volume 1, pages 492–497, Las Vegas, Nevada, 2003. 158, 159
- [DC02] T. DRUMMOND et R. CIPOLLA : Real-time visual tracking of complex structures. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(7):932–946, july 2002. 158
- [DCM03] Nicolai DECHEV, William L. CLEGHORN et James K. MILLS : Construction of 3d mems microstructures using robotic microassembly. *In IROS 2003*, 2003. 112
- [DCM04] N. DECHEV, W. L. CLEGHORN et J. K. MILLS : Microassembly of 3-d microstructures using a compliant, passive microgripper. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol 13, N0 2:176– 189, 2004. 18, 112
- [DD95] D. DEMENTHON et L. DAVIS : Model-based object pose in 25 lines of codes. *International Journal of Computer Vision*, 15(1-2):123–141, 1995. 106
- [Det97] L. DETTWILLER : *Les instruments d'optique, étude théorique, expérimentale et pratique*. Ellipses, 1997. 34
- [DK95] Gaudenz DANUSER et Olaf KUBLER : Calibration of cmo-stereomicroscopes in a micro robot system. *In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, volume 30/5W1, pages 345–353, 1995. 58
- [DLS03] André DEHON, Patrick LINCOLN et John E. SAVAGE : Stochastic assembly of sublithographic nanoscale interfaces. *In IEEE Transactions on Nanotechnology*, volume vol.2, N.3, 2003. 22
- [DRGB09] J. DEJEU, P. ROUGEOT, M. GAUTHIER et W. BOIREAU : Robotic microhandling controlled by chemical self-assembly. *In IEEE International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, 2009. 47
- [DSF⁺08] Lixin DONG, Kaiyu SHOU, Dominic R. FRUTIGER, STUDENT, Arunkumar SUBRAMANIAN, Li ZHANG, Bradley J. NELSON, SENIOR, Xinyong TAO et Xiaobin ZHANG : Engineering multiwalled carbon nanotubes inside a transmission electron microscope using nanorobotic manipulation. *In IEEE Transactions on Nanotechnology*, volume vol.7, N.4, 2008. 19
- [DSPS08] Aditya N. DAS, Jeongsik SIN, Dan O. POPA et Harry E. STEPHANOU : On the precision alignment and hybrid assembly aspects in manufacturing of a microspectrometer. *In IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, pages 100–106, Washington, DC, USA, august, 2008. 18
- [DV96] Gaudenz DANUSER et Commision V : Stereo light microscope calibration for 3d submicron vision. *In Proceedings of the 18th ISPRS Congress*, volume 31/B5, pages 101–108. ISPRS, 1996. 58
- [DWCdS05] Rajagopalan DEVANATHAN, Sun WENTING, Chin Teck CHAI et Andrew SHACKLOCK : *Multi View and Multi Scale Image Based Visual Servo For*

- Micromanipulation*, volume 8/2005. Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, 2005. [116](#)
- [DWCS06] R. DEVANATHAN, S. WENTING, S. CHAI et A. SHACKLOCK : Multi view and multi scale image based visual servo for micromanipulation. *Studies in Computational Intelligence*, 8:105–133, 2006. [116](#), [145](#)
- [DZP⁺07] A.N. DAS, ZHANG, P., LEE, W.H., POPA, D. et Harry E. STEPHANOU : Multiscale deterministic micro-nano assembly system for construction pf on-wafer microrobots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 461–466, Roma, Italy, april 2007. [18](#)
- [ECM03] Eniko T. ENIKOV, Scott CLARK et Lyubomir MINKOV : Micro-assembly cell with dual optical/computer vision control for electrostatic gripping of mems. In *SPIE Vol. 5267*, 2003. [21](#)
- [ECR92] B. ESPIAU, F. CHAUMETTE et P. RIVES : A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Transactions of Robotics and Automation*, 8(3):313–326, juin 1992. [101](#), [108](#)
- [EM04] E.T. ENIVKOV et L. MINKOV : Micro-assembly and packaging of mems using optically transparent electrostatic gripper. *ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2004. [110](#)
- [Esp93] B. ESPIAU : Effect of camera calibration errors on visual servoing in robotics. In *Int. Symposium on experimental Robotics, ISER'93*, Kyoto, 1993. [105](#)
- [Fai75] W. FAIG : Calibration of close-range photogrammetric systems : mathematical formulation. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 14 12:1479–1486, 1975. [56](#)
- [Fau93] O. FAUGERAS : *Three-dimensional computer vision : a geometric viewpoint*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993. [107](#)
- [FBS99] Sergej FATIKOW, Axel BUERKLE et Joerg SEYFRIED : Automatic control system of a microrobot-based microassembly station using computer vision. In *SPIE Vol. 3834. Part of the SPIE conference on Microrobotics and Microassembly*, pages 11–22, Boston, Massachusetts, USA, september 1999. [111](#)
- [FCH04] A. FERREIRA, C. CASSIER et S. HIRAI : Automatic microassembly system assisted by vision servoing and virtual reality. *IEEE Trans. on Mechatronics*, 09(2), 2004. [145](#)
- [FCM00] G. FLANDIN, F. CHAUMETTE et E. MARCHAND : Eye-in-hand / eye-to-hand cooperation for visual servoing. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 3, pages 2741–2746, San Francisco, CA, april 2000. [102](#)
- [Fea95] R. S. FEARING : Survey of sticking effects for micro parts handling. In *IEEE/RSJ International Conference Robots System*, pages 212–217, Pittsburgh, PA, USA, 1995. [xviii](#), [42](#), [43](#)

- [Fey95] R. P. FEYNMAN : There's plenty of room at the bottom. *Talk of the annual meeting of the American Physical Society at the California Institute of Technology (Cattech)*, december 1995. 42
- [FIG85] Groen F., Young IT. et Ligthart G. : focus functions for use in autofocus algorithms. *Cytometry*, 12:pp. 81–91, 1985. 75, 77
- [FLP01] O. D. FAUGERAS, Q. T. LUONG et T. PAPADOPOULOU : *The geometry of multiple images : the laws that govern the formation of multiple images of a scene and some of their applications*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 2001. 51
- [FS98] John T. FEDDEMA et Ronald W. SIMON : Visual servoing and cad-driven microassembly. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 5 (4):18–24, 1998. 110, 145
- [FSBS00] S. FATIKOW, J. SEYFRIED, ST. Fahlbuschand A. BUERKLE et F. SCHMOECKEL : A flexible microrobot-based microassembly station. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 27:135–169, 2000. 111
- [FSF02] S. FAHLBUSCH, A. SHIRINOV et S. FATIKOW : Afm-based micro force sensor and haptic interface for a nanohandling robot. *In IEEE International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, pages 1772–1777, Germany, 2002. 47
- [FTDFP08] Guillaume FORTIER, Brahim TAMADAZTE, Soukalo DEMBÉLÉ et Nadine Le FORT-PIAT : Estimating the 3d orientation of microgripper by processing the focus data from the images delivered by a videomicroscope. *In IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments*, pages 58–63, Ottawa, Canada, October 2008. 39, 83
- [FWH⁺07] S FATIKOW, T WICH, H HULSEN, T SIEVERS et M. JAHNISCH : Microrobot system for automatic nanohandling inside a scanning electron microscope. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, 12:244–252, june, 2007. 111
- [GGTVV05] H. GONG, J. GARCIA-TURIEL, K. VASILEV et O.I VINOGRADOVA : Interaction and adhesion properties of polyelectrolyte multilayers. *Langmuir, American Chemical Society*, 21:7545–7550, 2005. 47
- [GRRC06] M. GAUTHIER, S. RÉGNIER, P. ROUGEOT et N. CHAILLET : Analysis of forces for micromanipulations in dry and liquid media. *Journal of Micro-mechatronics*, 3:389–413, 2006. 44
- [HCR⁺06] J. Y. HUANG, S. CHEN, Z. F. REN, Z. Q. WANG, D. Z. WANG, M. VAZIRI, Z. SUO, G. CHEN, et M. S. DRESSELHAUS : Kink formation and motion in carbon nanotubes at high temperatures. *Physics Revue Letters*, pages 0755501–1–1–075501–4, 2006. 19
- [Hec90] L. HECHT : An introductory review of particle adhesion to solid surfaces. *Journal of the IES*, pages 33–37, march 1990. 44
- [HFGB] H. HÖTZENDORFER, M. FERROS, I. GIOUROUDI et W. BRENNER : Micro-manipulation system with stereoscopic imaging. *In The IASTED International Conference on Robotics and Applications*, pages 22–26. 110

- [HHC96] S. HUTCHINSON, G. HAGER et P. CORKE : A tutorial on visual servo control. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 12(3):651–670, octobre 1996. 101
- [HJL⁺89] R. HARALICK, H. JOO, C. LEE, X. ZHUANG, V VAIDYA et M. KIM : Pose estimation from corresponding point data. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 19(6):1426–1445, novembre 1989. 158
- [HM95] Radu HORAUD et Olivier MONGA : *Vision par ordinateur : Outils fondamentaux*. Hermes, 1995. 51
- [HMA95] K. HOSODA, H. MORIYAMA et M. ASADA : Visual servoing utilizing zoom mechanism. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 178–183, 1995. 116
- [HMD06] Heinz HÜGLI et James MURE-DUBOIS : 3d vision methods and selected experiences in micro and macro applications. In *Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology IV*, volume 6382, pages 638209 1–11, Boston, USA, 2006. 83
- [HP00] Jurgen HESSELBACH et Gero POKAR : Assembly of a miniature linear actuator using vision feedback. In *SPIE Vol. 4194*, 2000. 21
- [Hub81] P.-J. HUBER : *Robust Statistics*. Wiler, New York, 1981. 158, 159
- [JBJ⁺71] Brenner JF., Dew BS., Horton JB., King JB., Neirath PW. et Sellers WD. : An automated microscope for cytologic research. *Journal of Histochemical Society*, 24:pp. 100–111, 1971. 76
- [Kau08] J. KAUSHIK : *Development of vision systems for micro assembly operations*. Dual Degree Project - Stage 1 Report, 2008. 33
- [KCBWJ03] S. KOELEMMEIJER CHOLLET, F. BOURGEOIS, C. WULLIENS et J. JACOT : Cost modelling of microassembly. In *Fourth International Precision Assembly Seminar*, 2003. 23
- [KGD⁺03] A. KRUPA, J. GANGLOFF, C. DOIGNON, M. de MATHELIN, G. MOREL, J. LEROY, L. SOLER et J. MARESCAUX : Autonomous 3d positioning of surgical instruments in robotized laparoscopic surgery using visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(5):842–853, 2003. 101
- [Kim00] M. K. KIM : Tomographic three-dimensional imaging of a biological specimen using wavelength-scanning digital interference holograph. *Optics Express*, 7(9):305–310, 2000. xvi, 28, 29
- [KKLeL02] K. KIM, D.-H. KIM, S. J. LEE et J. et LEE : Hybrid microassembly system for three-dimensional mems components. In *International Workshop on Microfactories*, pages 21–24, 2002. 112
- [KMM⁺96] D. KHADRAOUI, G. MOTYL, P. MARTINET, J. GALLICE et F. CHAUMETTE : Visual servoing in robotics scheme using a camera/laserstripe sensor. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12 (5):743–750, 1996. 101

- [KMSS99] Takeshi KASAYA, Hideki MIYAZAKI, Shigeki SAITO et Tomomasa SATO : Micro object handling under sem by vision-based automatic control. *In Proc. on the Int. Conference on Robotique and Automation*, pages 2189–2196, 1999. [112](#)
- [KTS⁺77] S. KASHIOKA, S. TAKEDA, Y. SHIMA, T. UNO et T. HAMADA : An approach to the integrated intelligent robot with multiple sensory feedback : visual recognition techniques. *In Proc. of 7th Int. Sympo. on Industrial Robotics*, pages 531–538, Tokyo, Japan, October 1977. [104](#)
- [LKK⁺91] Firestone L., Cook K., Culp K., Talsania N. et Preston K : Comparison of autofocus methods for automated microscopy. *Cytometry*, 12:pp. 195–206, 1991. [75](#), [77](#)
- [LKK⁺01] Seok Joo LEE, Kyunghwan KIM, Deok-Ho KIM, Jong-Oh PARK et Gwi-Tae PARK : Recognizing and tracking 3d-shaped micro parts using multiple visions for micromanipulation. *In IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, pages 203–210, Nagoya in Japan, 2001. [112](#)
- [Lot06] Jean-François LOTS : *Application of visual servoing to the dynamic positioning of an underwater vehicle*. Thèse de doctorat, Heriot-Watt University, Dep. of Computing and Electrical Engineering, 2006. [101](#)
- [Low91] D.G. LOWE : Fitting parameterized three-dimensional models to images. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(5):441–450, mai 1991. [106](#), [158](#)
- [Low04] David G. LOWE : Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *In International Journal of Computer Vision*, volume 60(2), pages 91–110, 2004. [138](#)
- [Mal98] E. MALIS : *Contributions à la modélisation et à la commande en asservissement visuel*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Télécommunications et Traitement du Signal, 1998. [107](#)
- [Mas93] C. MASTRANGELO : Mechanical stability and adhesion of microstructures under capillary forces. *Journal of Microelectromechanical Systems, Part I*, 2(1):33–43, 1993. [44](#)
- [MCB98] E. MALIS, F. CHAUMETTE et S. BOUDET : 2D 1/2 visual servoing. Rapport technique 1166, IRISA, Février 1998. [107](#)
- [MCB99] E. MALIS, F. CHAUMETTE et S. BOUDET : 2 1/2 D visual servoing. *IEEE Tran. on Robotics and Automation*, 15(2):238–250, 1999. [156](#)
- [MCC02] P. MAHONY, F. CORKE et F. CHAUMETTE : Choice of image features for depth-axis control in image-based visual servo control. *In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, pages 390–395, Lausanne, Switzerland, octobre 2002. [105](#)
- [MCSP02] E. MARCHAND, F. CHAUMETTE, F. SPINDLER et M. PERRIER : Controlling an uninstrumented manipulator by visual servoing. *The Int. Journal of Robotics Research, IJRR*, 21(7):635–648, 2002. [156](#)

- [MGK96] P. MARTINET, J. GALLICE et D. KHADRAOUI : Robot control using 3D visual features. *In Word Automation Congress, WAC'96*, volume 3, pages 497–502, Montpellier, mai 1996. [106](#)
- [MHI⁺06] K. MIURA, K. HASHIMOTO, H. INOOKA, J. GANGLOFF et M. de MATHELIN : Model-less visual servoing using modified simplex optimization. *Artificial Life and Robotics*, 10(2):131–135, November 2006. [101](#)
- [MLL08] J. MINGUEZ, F. LAMIRAUX et J.P. LAUMOND : Obstacle avoidance techniques. *In Springer Handbook of Robotics*, pages 839–841, 2008. [132](#)
- [MR03] E. MALIS et P. RIVES : Robustness of image-based visual servoing with respect to depth distribution errors. *In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 2, pages 1056–1061, Taipei, Taiwan, septembre 2003. [109](#)
- [MSC05] E. MARCHAND, F. SPINDLER et F. CHAUMETTE : Visp for visual servoing : A generic software platform with a wide class of robot control skills. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 12(4):40–52, décembre 2005. [145](#), [186](#)
- [MTA93] Subbarao M., Choi TS. et Nikzad A. : Focusing techniques. *Journal of Optical Engineering*, 32:pp. 824–836, 1993. [75](#)
- [Nay89] Shree K. NAYAR : *Shape from focus*. Department of Electrical and Computer Engineering The Robotics Institute Carnegie Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania 15213, november, 1989. [83](#)
- [NNS03] Markus NIEDEROST, Jana NIEDEROST et Jiri SCUCCA : Automatic 3d reconstruction and visualization of microscopic objects from a monoscopic multifocus image sequence. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV-5/W10, 2003. [83](#)
- [NRZV99] B.J. NELSON, S. RALIS, Y. ZHOU et B. VIKRAMADITYA : Force and vision feedback for robotic manipulation of the microworld. *Experimental Robotics - VI-Lectures Notes in Control and Information Sciences*, 250:433–442, 1999. [110](#)
- [OG87] Faugeras O. et Toscani G. : Camera calibration for 3d computer vision. *In Proceedings of CVPR*, Tokyo, Japan, 1987. [55](#)
- [OSR75] F. M. ORR, L. E. SCRIVEN et A. P. RIVAS : Pendular rings between solids : meniscus properties and capillary force. *Journal of Fluid Mechanics*, 67(4):723–742, 1975. [44](#)
- [Par08] Mickaël PARIS : Conception et commande de systèmes d'alimentation en composants de petites tailles pour micro-usine d'assemblage de haute précision. Mémoire de D.E.A., Université de Franche Comté, 2008. [xvi](#), [32](#)
- [PKSZ02] Dan POPA, Byoung Hun KANG, Jeongsik SIN et Jie ZOU : Reconfigurable micro-assembly system for photonics applications. *In Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, USA, 2002. [110](#)

- [PS02] D. O. POPA et H. E. STEPHANOU : Micro and meso scale robotic assembly. Technical report (Zyvex company), 2002. [xiv](#), [23](#)
- [PV02] Song P. et Kumar V. : A potential field based approach to multi-robot manipulation. *In IEEE Conference on Robotics and Automation*, pages 1217–1222, Washington, DC, USA, 2002. [132](#)
- [RAK06] Micky RAKOTONDRABE : *Développement et commande modulaire d'une station de microassemblage*. Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB-CNRS), Université de Franche-Comté, novembre 2006. [xiv](#), [21](#)
- [RL88] R.Y. Tsai. R.K. LENZ : Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3d machine vision metrology. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(5):713–720, september, 1988. [64](#)
- [RRC05] P. ROUGEOT, S. RÉGNIER et N. CHAILLET : Forces analysis for micro-manipulation. *In Proc. of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRA*, pages 105–110, 2005. [47](#)
- [RVN00] Stephen RALIS, Barmeshwar VIKRAMADITYA et Bradley J. NELSON : Micropositioning of a weakly calibrated microassembly system using coarse-to-fine visual servoing strategies. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 23 (2):123–131, 2000. [110](#)
- [SF05] Torsten SIEVERS et Sergej FATIKOW : Visual servoing of a mobile microrobot inside a scanning electron microscope. *In 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, page 1682–1686, Edmonton, Canada, 2005. [111](#)
- [SGA98] L. S. SCHADLER, S. C. GIANNARIS et P. M. AJAYAN : Load transfer in carbon nanotube epoxy composites. *In Application Physics Letters*, pages 3842–3844, 1998. [19](#)
- [SI73] Y. SHIRAI et H. IRONE : Guiding a robot by visual feedback in assembling tasks. *Pattern Recognition*, 5:99–108, 1973. [101](#)
- [SLE91] C. SAMSON, M. LE BORGNE et B. ESPIAU : *Robot Control : the Task Function Approach*. Clarendon Press, Oxford, United Kingdom, 1991. [108](#)
- [SM99] P.F STURM et S.J. MAYBANK : On plane-based camera calibration : A general algorithm, singularities, applications. *In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 1, page 437, Fort Collins, USA, 1999. [57](#)
- [SM07] G. SILVEIRA et E. MALIS : Real-time visual tracking under arbitrary illumination changes. *In IEEE Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR'07*, Minneapolis, USA, juin 2007. [114](#)
- [SPNI06] Sascha A. STOETER, Martin PROBST, Bradley J. NELSON et Marta Abasolo IRANZO : Improving tracking precision for microassembly. *In Proceedings*

- of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation Orlando, Florida - May, 2006. 145
- [SS92] E. M. SLAYTER et H. S. SLAYTER : *Light and electron microscopy*. Cambridge University Press, 1992. 34
- [Stu97] Peter STURM : Self-calibration of a moving zoom-lens camera by pre-calibration. *Image and Vision Computing*, 15(8):583–589, Aug 1997. 58
- [SVS97] J. SANTOS-VICTOR et G. SANDINI : Visual behaviors for docking. *Computer Vision and Image Understanding*, 67(3):223–238, septembre 1997. 107
- [SY94] Nayar SK. et Nakagawa Y. : Shape from focus. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16:pp. 824–831, 1994. 76
- [TCC05] Xiaodong TAO, Hyungsuck CHO et Youngjun CHO : Microassembly of peg and hole using active zooming. In *Proc. of SPIE Vol. 6052*, 2005. 110
- [TDFL08] B. TAMADAZTE, S. DEMBÉLÉ, G. FORTIER et N. LE FORT-PIAT : Automatic micromanipulation using multiscale visual servoing. In *IEEE Conf on Automation Science and Engineering*, Washington, USA, August 2008. 21
- [Tsa87] Roger Y. TSAI : A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3(4):323–344, 1987. 55, 57, 64, 65
- [TSR93] Yeo T., Jayasooriah SO. et Sinniah R. : Autofocusing for tissue microscopy. *Image and Vision Computing*, 11(10):pp.629–639, 1993. 77
- [VN99] Barmeshwar VIKRAMADITYA et Bradley J. NELSON : Visually servoed micropositioning for robotic micromanipulation. *Microcomputer Applications*, 18:23–31, 1999. 110
- [Vol88] D. VOLLATH : The influence of the scene parameters and of noise on the behavior of automatic focusing algorithms. *Journal of Microscopy*, 151:pp.133–146, 1988. 78
- [WC96] D.B. WILLIAMS et C.B. CARTER : *Transmission Electron Microscopy*. Plenum, 4 tomes, 1996. 29
- [WC04] Sun WENTING et Chin Teck CHAI : Vision based micromanipulation using features : a multiple view approach. In *Proceedings of RAM*, pages 77–82, 2004. 116
- [Wed04] J. WEDEKIND : Focus set based reconstruction of micro-objects. In *IEEE Conference on Mechatronics & Robotics*, Aachen, Germany, 13-15 September, 2004. 83
- [Wei84] L.E WEISS : Dynamic visual servo control of robots. an adaptive image based approach. *Technical Report, CMU-RI-TR-84-16*, avril 1984. 105
- [WGW⁺07] J. WASON, W. GRESSIK, J.T. WEN, J. GORMAN et N. DAGALAKIS : Multi-probe micro-assembly. *Proc. in IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, Scottsdale USA, 2007. 111

- [WHB96] W. WILSON, C. HULLS et G. BELL : Relative end-effector control using cartesian position-based visual servoing. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 12(5):684–696, 1996. [106](#)
- [WKL04] P. J. WHITE, K. KOPANSKI et H. LIPSON : Stochastic self-reconfigurable cellular robotics. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004. [22](#)
- [WP04] M. WECK et C. PESCHKE : Equipement technology for flexible and automated micro-assembly. *Microsystem Technologies*, 10:241–246, 2004. [111](#)
- [WRHD79] M.R WARD, S. ROSSOL, S.W. HOLLAND et R. DEWAR : Consight : A pratical vision-based robot guidance system. In *Proc. of 9th Int. Sympo. on Industrial Robotics*, pages 195–211, Washington, USA, Mars 1979. [104](#)
- [WSN87] L. WEISS, A. SANDERSON et C. NEUMAN : Dynamic sensor-based control of robots using visual feedback. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(5):965–980, octobre 1987. [101](#)
- [YGN03] G. YANG, J. GAINES et B. NELSON : A surpervisory wafer-level 3d microassembly system for hybrid mems fabrication. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 37:43–68, 2003. [110](#)
- [YGN05] G. YANG, J. GAINES et B. NELSON : Optomechatronic design of microassembly systems for manufacturing hybrid microsystems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(4):1013–1023, 2005. [34](#)
- [YN05a] K. YESIN et B. NELSON : A cad-model based tracking system for visually guided microassembly. *Robotica*, 23:409–418, october 2005. [158](#)
- [YN05b] Kemal B. YESIN et Bradley J. NELSON : A cad model based tracking system for visually guided microassembly. *Robotica*, 23:409–418, 2005. [145](#)
- [ZH03] Thierry ZAMOFING et Heinz HÜGLI : Applied multifocus 3d microscopy. In *Two-and Three-Dimensional Vision Systems for Inspection, Control, and Metrology*, pages 134–144, 2003. [83](#)
- [Zha99] Zhengyou ZHANG : Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In *Seventh IEEE international conference on computer vision*, pages 666–673, Kerkyra, september, 1999. [57](#), [58](#)
- [ZN99] Yu ZHOU et Bradley J. NELSON : Calibration of a parametric model of an optical microscope. *Optical Engeenering*, vol. 38(12):1989–1995, september, 1999. [57](#), [58](#), [64](#), [110](#)

Index

Symbols

3D model-based tracking 157

A

actionneur piézo-électrique 122
 algorithme de type itératif 158
 algorithme SIFT 138
 algorithmes de traitement d'images ... 102
 algorithmes intuitifs 75
 analyse en composantes principales 89
 AS2M 2
 Assemblage déterministe 22
 Assemblage stochastique 22
 asservissement 2D1/2 107
 asservissement d2D/dt 107
 asservissement visuel 101
 asservissement visuel 2D multi-échelle .. 99
 auto-focalisation 74

B

barycentre 92
 bibliothèque de tracking 2D "ESM" ... 114
 BioMEMS 16
 bruit 85

C

calibrage 51
 calibrage multi-échelle 56, 62
 caméra embarquée 102
 caméra virtuelle 160
 champ de vision 36
 champ potentiel attractif 132
 champs potentiels 132
 champs potentiels répulsifs 132

codeurs 153
 colle à polymérisation ultra-violets 173
 commande hybride force/vision 21
 confiance de chaque primitive 159
 contraste 40
 convolution 76
 coordonnées articulaires 121
 coordonnées cartésiennes 121
 coordonnées métriques 55
 coordonnées pixelliques 55
 correcteur de type proportionnel 119
 corrélation 77
 courbes de Bézier 135
 coût d'assemblage 23
 cycle de micromanipulation 125
 cycles de prise et dépose 99

D

degré de netteté 84
 degrés de liberté 108
 descente du gradient 134
 distance de mise au point 38
 distance orthogonale 161
 distorsion 58
 distribution gaussienne 159
 dual tracking 151
 décroissance exponentielle 159

E

effets d'adhésion 130
 effets quantiques 42
 effets électrostatiques 130
 erreur 103

F

facteur de proportionnalité	159
facteurs d'échelle	63
faible capillarité	180
FEMTO-ST	2
filtrage gaussien	83
filtre gaussien	88
filtre moyennneur	87
fixation externes	163
fonction d'influence	159
fonction de Tukey	159
fonction de tâche	108
fonctionnalisation	47
force artificielle	133
force de blocage	179
Forces capillaires	44
Forces de Van der Waals	43
forces surfaciques	42, 43
forces volumiques	42
Forces électrostatiques	45
formulation de Rodriguez	160
fréquence d'acquisition	57

G

gain adaptatif	118
gamme d'assemblage	177
gradient	76

H

histogramme	75
homographie	115
hotte à flux laminaire	124
HYDROMEL	3

I

IBVS	105
imagerie médicale	158
informations aberrantes	158
interface homme-machine	171

J

jacobien	104
jacobien du robot	108

L

la Profondeur de Champ	35
Laplacien	76
loi de commande multi-échelle	115
Loi de commande robuste	158
longueur focale	37
look and move	103
Look and move dynamique	104
Look and move statique	104

M

markers	114
Masque binaire	83
Matlab	91
matrice d'interaction	108
matrice de combinaison	108
matrice de pondération	159
matrice de transformation homogène ...	52
matrice orthogonale	53
matrices de passages	175
MEMS	16
MEMS complexes	173
MEMS à deux niveaux	151
mesures visuelles	101
micro-assemblage	72
micro-assemblage parallèle	21, 22
micro-assemblage sériel	21
micro-imageur	102
micro-objets artificiels	99
micro-usine	38
microfibre optique	137
micromanipulation	72
microscope optique inversé	79
microscope photonique	26
Microscope à force atomique	31
Microscope électronique à balayage	29
Microscope électronique à transmission ..	29
microscopes à champ lointain	25
microscopes électroniques	28
Microscopie confocale	27
microscopie en champ proche	30
Microscopie optique à champ proche ...	32
Microscopie à champ lointain	25
Microscopie à contraste de phase	28

Microscopie à effet tunnel.....	31	polymérisation sous UV.....	180
Microscopie à fluorescence.....	26	polynôme de Bernstein.....	135
microsystème	16	pose 3D réelle	158
minimisation numérique de l'erreur....	158	pose-based visual servoing	105
mire réelle	59	position courante	107
mire virtuelle	58	position d'insertion	151
mise en correspondance	139	position désirée	103
mode manuel	166	position initiale	103
mode semi-automatique	181	processus d'assemblage.....	150
modèle CAO.....	157	projection.....	54
Modèle géométrique.....	121	pré-calibrage	58
modèle géométrique inverse	121	pseudo inverse de la matrice d'interaction	109
modèle sténopé	51	PZT	19
MOEMS.....	16		
moindres carrés	93, 158	R	
MST	17	reconstruction 3D.....	75
méthode S-DIST.....	139	repère caméra	52
méthode statistique	158	repère image	52
		repère rétinien	52
N		réalité augmentée	101
NEMS.....	16	réalité virtuelle.....	58
netteté.....	74	régulation.....	135
nombre d'itérations du processus de		résidu normal.....	159
minimisation	161		
O		S	
occultation.....	130	schéma fonctionnel.....	151
ondelettes de Haar	76	seuillage	84
OpenGL	91	single tracking.....	151
optimisation non-linéaire.....	160	solidarisation des microsystèmes assemblés	180
opérateur humain.....	166	solidariser des matériaux hybrides....	180
organes terminaux	75	solidité	171
ouverture numérique	38	solvant.....	180
P		stabilité asymptotique globale.....	160
paramètres extrinsèques.....	55	station SAMMI.....	157
paramètres intrinsèques	55	Structure mécanique.....	120
physiques newtonienne	42	stéréo calibrage	58
phénomènes quantiques	19	sub-pixelique	60
pixels-obstacles	134	suivi de trajectoire.....	135
planification de trajectoire	132	suivi robuste	158
point principal.....	59	système de feeding.....	130
points d'intérêt	138	Système de préhension	122
polymérisation contrôlée	180	Système de vision	123

T

Table anti-vibrations	124
technique des M-estimateurs	158
techniques de filtrage	83
tolérance d'insertion	163
Tracking 3D	157
tracking du gripper	82
transformation affine	54
transformation homographique	58
transformation incrémentale	115
transformation rigide	147
traînage	135
triangulation	91
tâche d'asservissement visuel	101

V

valeur médiane des résidus	159
variance	77
vecteur déplacement	149
viscosité	180
vue plongeante	163

É

éclairage diascopique	39
éclairage épiscopique	39

Résumé

La manipulation et le micro-assemblage de composants de taille micrométrique ($1\text{ }\mu\text{m} \rightarrow 1\text{ mm}$) afin de réaliser des microsystèmes posent énormément de problèmes. À cette échelle les composants sont quasiment invisibles à l'œil nu et on constate une inversion de l'importance des forces : les forces surfaciques (capillarité, Van der Waals, électrostatiques, ...) deviennent prépondérantes par rapport aux forces volumiques (poids, inertie). Il est ainsi nécessaire et indispensable de mettre en œuvre des stratégies novatrices appropriées tant du point de vue de l'imagerie et de la vision que de la manipulation et de la commande pour la fabrication des microsystèmes. Le micro-assemblage comporte des tâches de micromanipulation (positionnement, prise, transfert, dépose, ...) ainsi que tâches plus complexes (orientation dans l'espace, insertion, ...). Nos travaux répondent clairement à ces attentes c'est-à-dire utiliser un système de vision (un microscope optique) pour automatiser des tâches simples de manipulation de microcomposants et des tâches plus complexes d'assemblage de MEMS. Plusieurs lois de commande ont été développées telles qu'un asservissement visuel 2D multi-échelle pour la manipulation et un asservissement visuel 3D pour l'assemblage. Pour les deux approches développées, la précision et la répétabilité obtenues sur les processus de manipulation et d'assemblage sont satisfaisantes. Cependant, avant toute chose, le système de vision doit être calibré pour atteindre de meilleures performances. Dans cet objectif, une méthode de calibrage multi-échelle de microscopes photoniques a été présentée et détaillée. À partir de l'étude des contraintes liées à l'utilisation de ce genre d'imageur, des techniques de vision 3D telles le depth-from-focus et le pose-from-focus ont été pensées et intégrées pour aboutir à une station de micro-assemblage entièrement automatisée.

Mots-clés : Asservissement visuel, vision 3D, calibrage, micromanipulation, micro-assemblage, MEMS, microrobotique et station de micro-assemblage.

Abstract

The micromanipulation and the microassembly of microcomponents ($1\text{ }\mu\text{m} \rightarrow 1\text{ mm}$) in order to produce microsystems are incredibly difficult. At this scale, components are almost not visible to the naked eye and there is a reversal of the importance of the forces : the surface forces (capillarity, Van der Waals, electrostatic ...) become predominate compared to volume forces (weight, inertia). It is thus necessary and essential to solve this problem to solve the problems to carry out innovative strategies appropriate to imaging system and vision techniques as well as to manipulation and control strategies. The microassembly involves micromanipulation tasks (positioning, pick, transfer, place ...) as well as more complex tasks (spatial orientation, insertion ...). Our work concerns the use of a vision system (optical microscope) in order to automate simple tasks of manipulating microcomponents and more complex tasks for MEMS assembly. Several control laws have been developed : 2D multi-scale image-based visual servoing for micromanipulation and pose-based visual servoing for 3D MEMS assembly. For both approaches developed, the accuracy and repeatability obtained in the process of handling and assembly are satisfactory. However, above all, the vision system must be calibrated for best performances. To do this, a multiple scale calibration method for calibrating photonic microscopes has been presented and detailed. From the study of the constraints related to the use of such imaging system, 3D vision techniques such as depth-from-focus and pose-from-focus has been developed and integrated to realize to the full-automation of a microassembly workcell.

Keywords : Visual servoing, 3D vision, calibration, micromanipulation, microassembly, MEMS, microrobotic and microassembly workcell.